

MAADOITUSVASTUSARVON MÄÄRITTÄMINEN JA MIT- TAUSMENETELMIEN KÄYTTÖ

Andriy Voloshyn

Opinnäytetyö
Tekniikka ja liikenne
Sähkö- ja automaatiotekniikka
Insinööri (AMK)

2020

Tekniikka ja liikenne
Sähkö- ja automaatiotekniikka
Insinööri (AMK)

Tekijä	Andriy Voloshyn	Vuosi	2020
Ohjaaja(t)	Ins, (YAMK) Aila Petäjäjärvi		
Toimeksiantaja	Lapin AMK, Lab. ins, Jouko Alaniva		
Työn nimi	Maadoitusvastusarvon määrittäminen ja mittausmenetelmien käyttö		
Sivu- ja liitesivumäärä	76 + 5		

Opinnäytetyön tavoitteena oli maadoitusvastusarvon määrittäminen ja maadoitusvastusarvon mittaus erilaisia mittausmenetelmiä käyttäen. Teoreettisen pohjan avulla selvitettiin maadoitusvastuksen roolia maadoitusjärjestelmissä, maadoitusvastusarvon muodostavia sekä sitä muuttavia tekijöitä ja muita maadoitusarvojen mittauksiin liittyviä asioita. Mittauksista saatuja tietoja verrattiin teoretietoihin ja näiden tuloksena saatiin ajatuskuva maadoitusvastusarvon määrittämisestä ja mittausprosessista.

Työn tutkimuksellisessa osassa selvitettiin maadoitukseen liittyviä ilmiöitä ja maadoitusvastuksen tarkoitusta. Maadoitusvastuksen tehtävänä on ensisijaisesti varmistaa maadoitusjärjestelmän turvallinen toiminta. Maadoitusjärjestelmän toimivuuteen vaikuttavat monet eri tekijät. Työssä tutkittiin erilaisten maadoitusjärjestelmien toimintamalleja, osia ja komponentteja ja niille asetettuja vaatimuksia. Opinnäytetyössä käsiteltiin myös maaperän johtavuutta, maadoitusvastukselle sallittuja arvoja sekä nykyään käytössä olevia mittausmenetelmiä.

Maadoitusvastusarvon mittaukset tehtiin Lapin ammattikorkeakoulun Kemin toimipisteessä, Tietokatu 1:ssä olevalle pylväsmuuntajalle. Mittaukset suoritettiin käännepiste- ja kaksijohtimisella menetelmillä. Mittaustulosten käsittelyssä ja analysoinnissa huomioitiin mittausolosuhteiden vaikutuksia ja mahdollisia virhetekijöitä. Mittaustulosten käsittelyssä vertailtiin kahdella eri menetelmällä saatuja tuloksia ja menetelmien käyttöä.

Opinnäytetyön tulokseksi saatiin teoreettinen tietopaketti maadoitusmittauksista ja niiden suorittamisesta, sekä ohjeistus maadoitusvastusarvon määrittämiseen ja mittaamiseen. Opinnäytetyössä on tuotu esille myös ongelmia ja mahdollisia virhetekijöitä, joita maadoitusmittauksia suorittava henkilö voi kohdata työssään.

Avainsanat maadoitusvastus, maadoitusjärjestelmä, maaperän johtavuus

Technology, Communication and Transport
Electrical and Automation Engineering
Bachelor of Engineering

Author	Andriy Voloshyn	Year	2020
Supervisor	Aila Petäjäjärvi, M.Sc.		
Commissioned by	Lapland University of Applied Sciences, Jouko Alaniva, Lab. Eng		
Subject of thesis	Determination of Earth Resistance Value and Methods of Measurement		
Number of pages	76 + 5		

The objective of the thesis was to determine the earth resistance value and to measure the earth resistance value using different measuring methods. The role of the earth resistance in the earthing systems, the factors forming and changing the earth resistance value and other facts related to the measurement of the earthing values were investigated using a theoretical basis. The information obtained from the measurements were compared with the theoretical data, and as a result, an idea of the earth resistance value determination and measurement process was gained.

In the research part of the thesis, the phenomena related to the earthing and the purpose of earth resistance were determined. The primary purpose of the earth resistance is to ensure the safe operation of the earthing system. The functioning of the earthing system is affected by many different factors. The functional models, parts and components of different earthing systems and their requirements were investigated in the thesis. Soil conductivity, allowable values for earth resistance and the measurement methods used nowadays were also processed.

The earth resistance value measurements were made for a pole distribution transformer at Tietokatu 1, Lapland University of Applied Sciences. Measurements were made using Fall-of-Potential and Two-pole test methods. The effects of the measurement conditions and possible error factors were considered in the processing and analysis of the measurement results. In the processing of the measurement results, the results obtained by two different methods and the usage of the methods were compared.

The thesis resulted in a theoretical information package of earthing measurements and their performance, as well as in the instructions for determining and measuring the earth resistance value. The thesis also highlights problems and possible error factors that a person performing earthing measurements may encounter.

Key words earth resistance, earthing system, soil conductivity

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	9
2	MAADOITUKSEN JA POTENTIAALINTASAUKSEN KÄYTTÖTARKOITUS	10
2.1	Suojaus sähkövikoja vastaan.....	10
2.2	Suojaus sähköhäiriöistä	12
2.3	Suojaus ylijännitteiltä	12
3	MAADOITUS	14
3.1	Maadoituselektrodit.....	14
3.2	Maadoitusimpedanssi, -resistanssi ja -vastus.....	16
3.2.1	Maadoitusvastusarvot maadoitusjärjestelmissä	17
3.2.2	Maadoitusvastusarvoon vaikuttavat maadoituselektrodien mitoitukset	18
3.3	Maaperän resistiivisyys.....	20
4	MAADOITUSJÄRJESTELMÄT	23
4.1	Pienjännitemaadoitusjärjestelmä	23
4.2	Suurjännitemaadoitusjärjestelmä	26
4.2.1	Yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä	26
4.2.2	Laaja maadoitusjärjestelmä.....	27
4.3	Muuntamon maadoitus	27
5	MAADOITUSJÄRJESTELMILLE ASETETUT VAATIMUKSET	30
5.1	Korroosiokestävyys ja mekaaninen lujuus	30
5.2	Terminen lujuuden kestävyys	32
5.3	Maadoitus-, kosketus- ja askeljännite	34
6	MAADOITUSARVOJEN MITTAUKSET	39
6.1	Mittalaitteet	40
6.2	Maaperän resistiivisyyden mittaus	41
6.2.1	Wenner-menetelmä.....	41
6.2.2	Schlumberg-menetelmä	43
6.3	Maadoitusvastusarvon mittaus	44
6.3.1	Suurtaajuusmenetelmä	45
6.3.2	Voltti-ampeerimenetelmä	46
6.3.3	Maasulkumittausmenetelmä.....	47

6.3.4	Käännepistemenetelmä.....	47
6.3.5	Mittaus yhdellä apuelektrodilla	55
6.3.6	Vaihe-Pe silmukkamittaus	56
6.3.7	Kaksijohtiminen menetelmä	57
6.3.8	Yksittäisiin resistansseihin perustuva menetelmä	58
6.3.9	Selektiivinen menetelmä	59
6.3.10	Sauvaton menetelmä	60
7	MAADOITUSVASTUSARVON MITTAUSMENETELMIEN VERTAILU JA VALINTA.....	64
8	SUORITETUT MITTAUKSET	66
8.1	Mittauskohde	66
8.2	Maadoitusvastusmittari ja muut mittausvälineet.....	67
8.3	Käännepistemittaus	67
8.4	Kaksijohtiminen mittaus	69
9	TULOSTEN KÄSITTELY	71
10	POHDINTA	73
	LÄHTEET.....	75
	LIITTEET	76

ALKUSANAT

Haluan kiittää ohjaajaani, sähkö- ja automaatiotekniikan lehtori Aila Petäjäjärveä opinnäytetyöni ohjaamisesta ja avusta sen laatimisessa. Kiitän myös Lapin ammattikorkeakoulua ja laboratorioinsinööri Jouko Alanivaa opettavasta, ajatuksia herättävästä ja mielenkiintoisesta opinnäytetyön aiheesta.

Torniossa 24.2.2020

Andriy Voloshyn

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

ART	Attached Rod Technique, liitetty tankotekniikka – mitausmenetelmä (Heard 2012)
EMC	Electromagnetic compatibility, sähkömagneettinen yhteensopivuus
EMI	Electromagnetic interference, sähkömagneettinen häiriö
EN 61010	Eurooppalainen standardi, joka antaa yleiset turvallisuusvaatimukset sähköisille laitteille
FE	Functional Earthing, toiminnallinen maadoitus
IEC 61326	Kansainvälinen standardi, joka antaa yleiset turvallisuusvaatimukset sähköisille laitteille
IEC 61557	Kansainvälinen standardi, joka antaa yleiset turvallisuusvaatimukset pienjännitteisille järjestelmille
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, kansainvälinen tekniikan alan järjestö
IT	Isolated Terra, maasta erotettu järjestelmä
MEB	Main Earthing Busbar, päämaadoituskisko
NEC	National Electrical Code, yhdysvaltalainen standardi, joka antaa turvallisuusvaatimukset sähköjohdotukselle ja sähköisille laitteille
NFPA	National Fire Protection Association, yhdysvaltalainen paloturvallisuusjärjestö
PE	Protective Earth, suojamaadoitus
PEN	Protective Earth Neutral, nolla- ja suojamaadoitus
referenssimaa	maan johtava osa, jonka sähköiseksi potentiaaliksi missä tahansa kohdassa on sovittu nolla, ja joka on kaikkien maadoitusjärjestelmien vaikutuksen ulkopuolella
RFI	Radio-frequency interference, radiotaajuushäiriö
SFS 6000	Suomalainen standardisarja, pienjänniteasennukset
SFS 6001	Suomalainen standardisarja, suurjänniteasennukset
TN	Terra Neutral, järjestelmä, jossa yksi piste on maadoi-

	tettu ja sähkölaitteiston jännitteelle alttiit osat on yhdistetty maadoituspisteeseen suojamaadoitusjohtimella tai PEN-johtimella
TN-C	Terra Neutral Combined, järjestelmä, jossa on yhdistetty nolla- ja suojamaadoitusjohdin
TN-C-S	Terra Neutral Combined Separated, järjestelmä, jossa nolla- ja suojamaadoitusjohtimet on yhdistetty yhteen PEN-johtimeksi vain järjestelmän osassa
TN-S	Terra Neutral Separated, järjestelmä, jossa erillinen nolla- ja suojamaadoitusjohdin on viety pitkiin koko järjestelmässä
transientti	sähkötekniikassa nopea virran, jännitteen tai taajuuden muutos
TT	Terra Terra, järjestelmä, jossa yksi piste on maadoitettu ja sähkölaitteistojen jännitteelle alttiit osat on maadoitettu erikseen maadoituselektrodin avulla
UPS	Uninterruptible Power Supply, järjestelmä tai laite, jonka tehtävä on taata tasainen virransyöttö lyhyissä katkoksissa ja syöttöjännitteen epätasaisuuksissa
VAC	Alternating Current Voltage, vaihtovirtajännite
VVSK	vikavirtasuojakytkin

1 JOHDANTO

Maadoitusvastus on jokaisessa sähköjakeluverkossa. Maadoitusvastuksella, joka toimii maadoituksen osana, on oma rooli maadoitusverkossa. Vaikka sen vaikutus verkon toimintaan on riippuvainen käytetystä järjestelmästä, maadoitusvastusarvon määrittäminen tai mittaus on yleensä pakollinen tai ainakin suositeltu tekijä, joka tekee maadoitusvastuksesta vieläkin tärkeämmän.

Opinnäytetyössä esitellään maadoitusvastusarvon määrittämiseen liittyvät tekijät ja suoritetaan maadoitusvastusarvon mittaus kahden eri mittausmenetelmien avulla. Koska maadoitusarvon määrittäminen ja mittaus vaativat tietoja maadoitusverkon toimintaperiaatteesta sekä verkossa tapahtuvista prosesseista, opinnäytetyössä tutustutaan vastaavaan teoreettiseen pohjaan, ennen työn varsinaista soveltavaa osuutta.

Opinnäytetyön toimeksiantaja on Lapin ammattikorkeakoulu. Maadoitusvastusarvojen mittaukset suoritettiin Kemin toimipisteessä Tietokatu 1:ssä. Mittaukset tehtiin sähkö- ja automaatiokoulutuksen opetuslaitteiston 20 kV:n ilmalinjan pylväsmuuntajalle. Työssä käytettiin toimeksiantajan mittausvälineistöä ja muita opinnäytetyön tekemistä helpottavia resursseja.

Opinnäytetyön tavoitteena on perehtyä maadoitusvastusarvon määrittämiseen ja maadoitusvastusarvon mittaus enemmän kuin yhden mittausmenetelmän avulla. Mittausmenetelmän käyttö on riippuvainen käytetystä mittauslaitteistosta ja mitattavasta kohteesta. Teoria-osassa on käsitelty käytettyjen mittausmenetelmien lisäksi myös muita maadoitusvastuksen mittausmenetelmiä ja niihin liittyviä asioita.

2 MAADOITUKSEN JA POTENTIAALINTASAUKSEN KÄYTTÖTARKOITUS

Monet sähköjärjestelmien jännitteet sekä sähköjärjestelmissä kulkevat virrat voivat muodostaa sähköiskun vaaran sähköjärjestelmien eristys- tai muiden sähkövikojen tilanteissa. Näissä tilanteissa vaaralliset virrat voivat liikkua myös muilla johtavilla osilla, jotka ovat normaalikäytössä virrattomia ja jännitteettömiä. Lisäksi sähkölaitteisiin voi tulla vikoja, harmoninen särö voi aiheuttaa ongelmia ja sähköjärjestelmässä voi tulla esille tehokerroinongelmia tai monia muita satunnaisvikoja (Fluke 2017, 2).

Maadoituksen tehtävänä on mahdollistaa sähköjärjestelmän turvallinen ja luotettava toiminta. Maadoituksen käyttö estää kosketusjännitteiden syntymistä jännitteelle alttiilla osilla vikatapauksessa. Potentiaalintasaus muodostaa tasapotentiaalilin, jotta jännitteelle alttiin osien ja myös muiden johtavien osien (kuten rakennuksen johtavien putkistojen) välillä ei esiinny jännite-eroa sekä kosketusjännitettä vian aikana. Maadoitukset ja potentiaalintasaukset kytketään yhteen rakennuksen sähköjärjestelmässä. (Ylinen 2016, 6, 13 – 14, 33.)

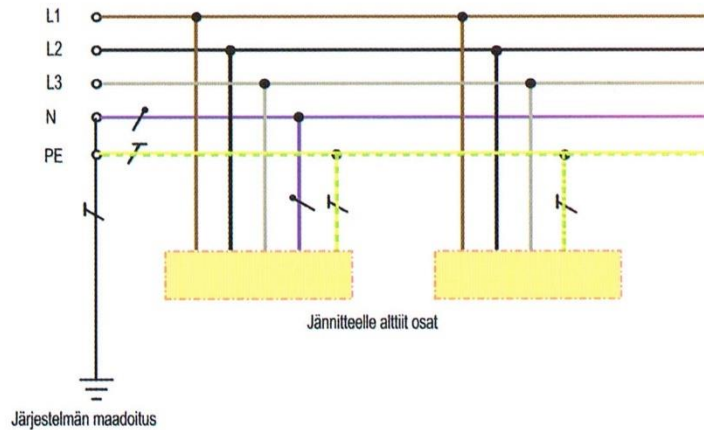
Maadoitus- ja potentiaalintasausjärjestelmät suojaavat myös muilta vioilta, kuten häiriö- ja ylijännitevioletta (Ylinen 2016, 6). Maadoitusten ja potentiaalintasauksien toteutuksista on annettu määräykset SFS 6000 ja SFS 6001 -standardeissa sähköjärjestelmistä riippuen.

2.1 Suojaus sähkövikojen vastaan

Sähköasennus tai sähkölaite ei saa aiheuttaa sähköiskun vaaraa normaalikäytössä eikä vikatilanteessakaan. Sähköiskulta suojaava maadoitus nimetään suojaamaadoitukseksi. Vastaavasti suojatarkoitukseen käytetty potentiaalintasaus nimetään suojaavaksi potentiaalintasaukseksi. Sekä suojaamaadoitus että suojaava potentiaalintasaus ovat vikasuojausmenetelmän osia. Syötön nopea poiskytkentä on yleisin vikasuojausmenetelmä, jonka suojalaite katkaisee virtapiiriin vian sattuessa. (Kauppila, Koivisto, Nurmen, Tiaisen & Ylinen 2019, 9 – 10, 13, 16, 21 – 22.)

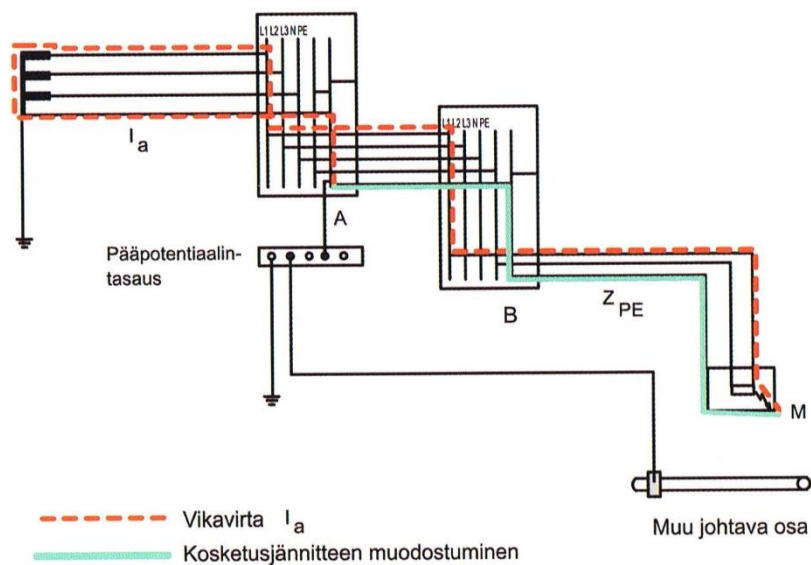
TN-järjestelmä (Kuvio 1) on yleisin Suomessa käytetty järjestelmä, jossa suojaamaadoitus on yhdistetty järjestelmän maadoitukseen vain järjestelmän yhdessä

pisteessä, joka on maadoitettu suoraan teholähteessä. (SFS 6000-1:2017, 40; Kauppila ym. 2019, 16 – 17).



Kuvio 1. TN-S-järjestelmä (SFS 6000-1:2017, 40; Kauppila ym. 2019, 17).

Kuviossa 2 on esitetty automaattisen poiskytkennän vikasuojaus, kun vaihejohdin on oikosulussa sähkölaitteen runkoon.



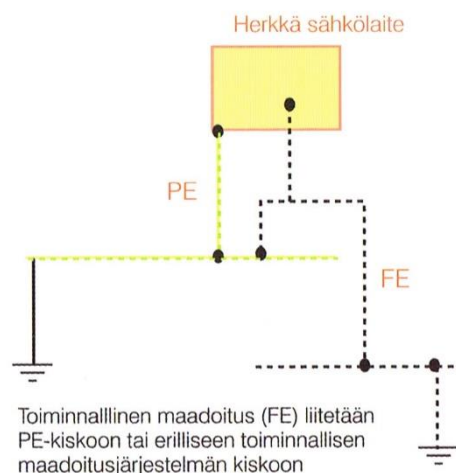
Kuvio 2. Suojaus syötön automaattisen poiskytkennän avulla (Kauppila ym. 2019, 11).

2.2 Suojaus sähköhäiriöistä

Maadoituksella luodaan purkautumisväylä staattiselle lataukselle, EMI- ja RFI-signaaleille ja muille sähköhäiriöille. TN-S-järjestelmä on häiriösuojauksen ensisijainen järjestelmä. (Ylinen 2016, 6; Fluke 2017, 2.)

Maadoitukset ja potentiaalintasaukset, joiden käyttö on muu syy kuin sähköiskulta suojaaminen, nimetään toiminalliseksi maadoitukseksi ja potentiaalintasaukseksi. Herkän tietoteknisen järjestelmän häiriöttömän toiminnan kannalta käytetään toiminnallista maadoitusta ja potentiaalintasausta. (Kauppila ym. 2019, 17, 22.)

Toiminnallinen maadoitus yhdistetään suoraan suojamaadoitukseen. Toiminallinen maadoitus voidaan liittää myös erilliseen toiminnallisen kiskoon toiminnallisen maadoitusjohtimen avulla (Kuvio 3). (Kauppila ym. 2019, 16, 24 – 25.)



Kuvio 3. Esimerkki toiminnallisesta maadoitusjohtimesta (Kauppila ym. 2019, 25).

2.3 Suojaus ylijännitteiltä

Ukkoset ja salamaiskut ovat tekijöitä, jotka voivat aiheuttaa ylijännitteitä. Salaman iskiessä jakelumuuntajan suurjännite- tai pienjännitejohtoon liikkuvat ylijännitteet toisesta verkosta toiseen. Myös sähköverkon erilaiset kytkentätoimenpiteet, sähköstaattiset purkaukset ja muut lyhytaikaiset ylijännitteet (transientit) voivat nostaa jännitettä muutamiin megavoltteihin.

Koska ylijännitteet esiintyvät erityisesti eri verkkojen välillä, jakelumuuntajilla käytetään suurjännite- ja pienjännitepuolen yhdistettyä maadoitusta. Myös tele- ja pienjänniteverkon maadoitus yhdistetään, kun siihen on mahdollisuus. Näin yhteismaadoitus estää ylijännitteen kulkua eri verkkojen välissä. (Annanpalo ym. 2012, 35.)

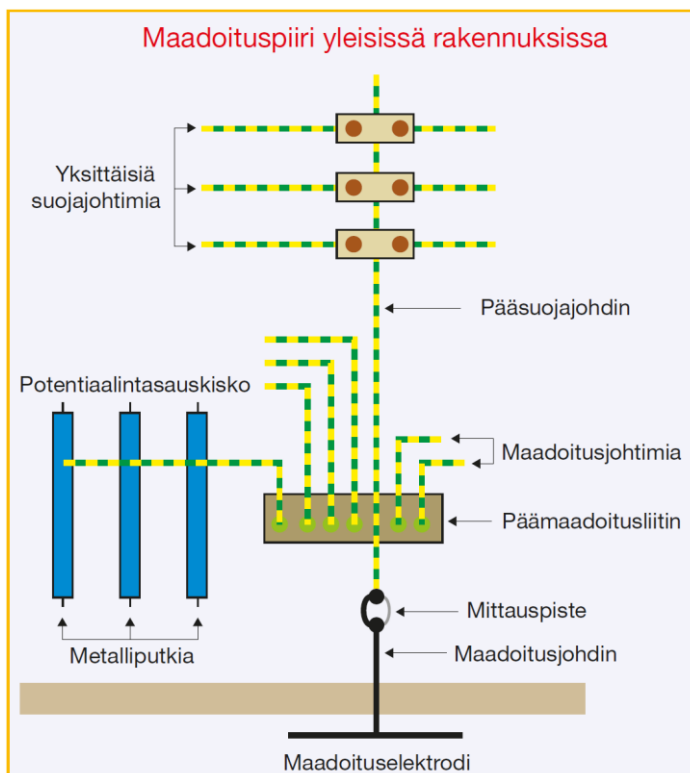
3 MAADOITUS

Maadoitusten toteutuminen edellyttää maadoitusjärjestelmän mitoitusta ja suunnittelua. Maadoitusjärjestelmä koostuu erilaisista komponenteista. Yleisimmät niistä ovat maadoituselektrodit, maadoitus- ja potentiaalintasausjohtimet, joita muiden maadoitusosien mukana kytketään maadoitusliittimeen tai -kiskoon (Kuvio 4).

Maadoituselektrodit asennetaan maahan, ja maadoitusjohtimen kautta muodostuu sähköisen yhteyden maadoitusjärjestelmään. Maadoituselektrodin mitoituksessa sekä myöhemmin mittauksessa on otettava huomioon erilaisia tekijöitä, jotka vaikuttavat maadoitusjärjestelmän turvallisen toimintaan.

3.1 Maadoituselektrodit

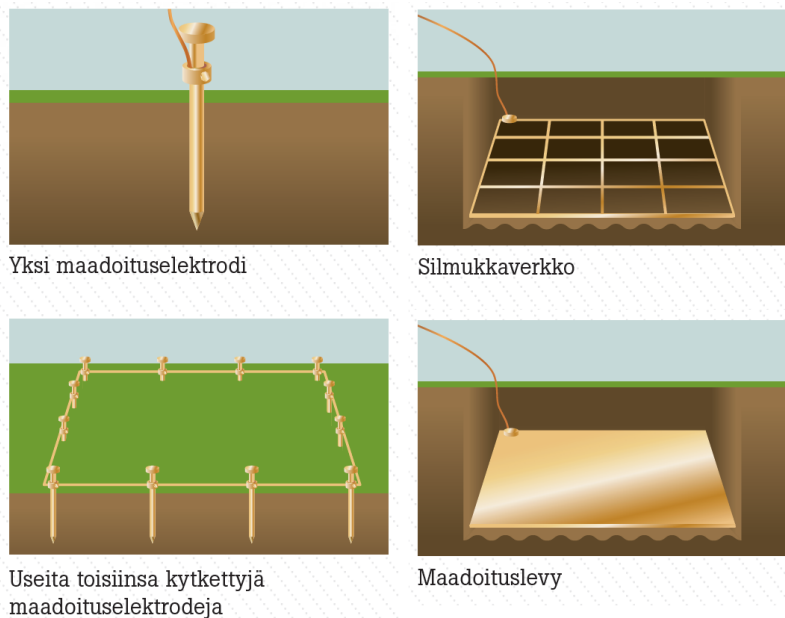
Maadoituselektrodi rakennetaan yleensä suojausvaatimusten takia, mutta se voi toimia myös osana salamasuojausjärjestelmää. Maadoituselektrodilla on merkitystä myös potentiaalintasauksen kannalta. (Kauppila ym. 2019, 128.)



Kuvio 4. Maadoituspiiri yleisissä rakennuksissa (Chauvin Arnoux 2018, 3).

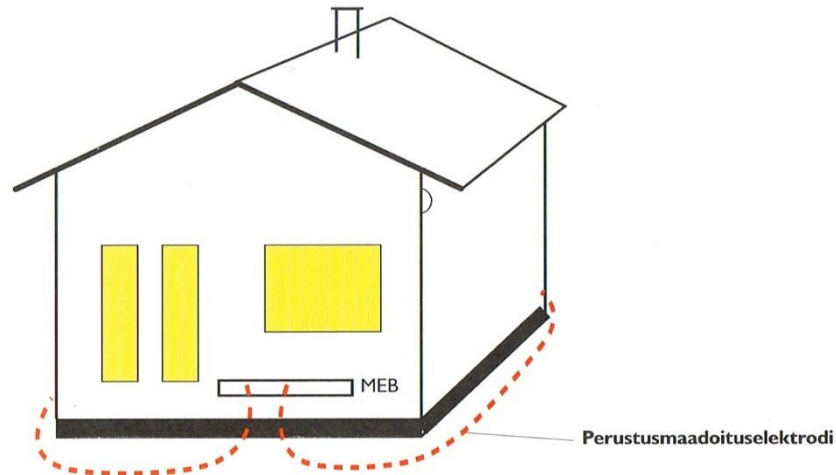
Yleiset maadoitusjärjestelmän maadoituselektrodit ovat vaaka-, pysty- tai vi-noelektrodeja. Maadoituselektrodit kaivetaan tai lyödään maahan. Vaakaelektrodeja käytetään eniten, mutta myös pystyelektrodien käyttö on lisääntynyt. (SFS 6001:2018, 97; Kauppila ym. 2019, 58 – 59.)

Yleisin maadoitustapa käyttää vain yhtä maadoituselektrodia. Sen maadoitustavan käytetään esimerkiksi kotien ja liikekiinteistöjen maadoittamisessa. Monimutkaiset maadoitusjärjestelmät koostuvat monista maadoitussauvoista, toisiinsa liitetyistä ruudukko- tai silmukkaverkoista, maadoituslevyistä ja maadoitussilmukoista (Kuvio 5). Tällaisia järjestelmiä käytetään yleensä matkapuhelinmastoalueilla ja sähköasemilla. (Fluke 2017, 5.)



Kuvio 5. Maadoitusjärjestelmät (Fluke 2017, 5).

Rakennuksen sähkölaitteiston maadoituksessa ensisijaisesti käytetään perustusmaadoituselektrodia, jonka muoto on rengasmaisen (Kuvio 6). Rengasmaisen elektrodirakenne on myös paras salamasuojauksen kannalta. Muuntajan elektrodirakenteena käytetään eniten vaakaelektrodia. Yleensä muuntajalle asennetaan myös potentiaalinohjauselektrodi, joka yhdistetään muuntajan muihin maadoituksiin. (Annanpalo ym. 2012, 98; Kauppila ym. 2019, 15, 137.)

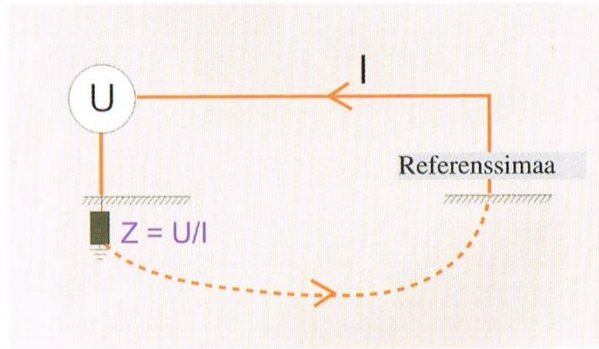


Kuvio 6. Rakennuksessa tulee käyttää ensisijaisesti perustusmaadoituselektrodiä (Kauppila ym. 2019, 15).

Maadoituselektrodin pituudella, syvyydellä, halkaisijalla, lukumäärällä sekä maadoitusjärjestelmän rakenteella voidaan vaikuttaa saavutettavaan maadoitusresistanssiin sekä määrittää potentiaalintasausvaikutus. Maaperän johtavuus on toinen tekijä, joka vaikuttaa maadoituselektrodin mitoitukseen sekä maadoitusresistanssin arvoon. (Kauppila ym. 2019, 14 – 15.)

3.2 Maadoitusimpedanssi, -resistanssi ja -vastus

Maadoitusimpedanssi on laitteen, asennuksen tai järjestelmän pisteestä mitattu maadoituselektrodin ja maan (referenssimaan) välinen impedanssi (Kuvio 7). Maadoitusimpedanssi-nimitystä käytetään laajojen maadoitusjärjestelmien yhteydessä. Maadoitusresistanssi on maadoitusimpedanssin reaalinen osa. Tätä nimitystä käytetään esimerkiksi pistemäisen maadoituselektrodin yhteydessä. Maadoitusvastus on yleisesti käytetty sana kaikkien maadoitusten yhteydessä. (Monni 2015, 134 – 135; Kauppila ym. 2019, 14, 20 – 21.)



Kuvio 7. Maadoitusimpedanssilla tarkoitetaan impedanssia määrätyn pisteen ja referenssimaan välillä (Kauppila ym. 2019, 20).

3.2.1 Maadoitusvastusarvot maadoitusjärjestelmissä

Maadoitusvastusarvo vaihtelee nolasta ohmista satoihin tuhansiin ohmeihin. Maadoitusvastusarvolla, joka on nolla tai lähestyy nollaan, on yleensä paras teoreettinen maadoitusvastusarvo. Joissakin tilanteissa, esimerkiksi potentiaalinohjauselektrodeja käyttäessä, suurikin maadoitusvastusarvo on hyväksyttävä. Eri organisaatioissa ovat omat suositukset hyvälle maadoitusvastusarvolle. NFPA:n ja IEEE:n mukaan suositellun maadoitusarvon pitäisi olla enintään 5,0 ohmia. NEC edellyttää, että sen arvo olisi alle 25 ohmia sekä 5,0 ohmia laitoksissa, joissa on herkkiä laitteita. Tietoliikenneteollisuudessa on yleensä käytetty maadoitus- ja liitosarvona maksimissaan 5,0 ohmia. (Fluke 2017, 3; Kauppila ym. 2019, 15, 20.)

Maadoitusvastusarvolla ei ole suurta merkitystä pienjännitejärjestelmissä itse pienjänniteasennukselle. Käytännössä vikatilanteissa pienjännitejärjestelmien maadoitusjohtimissa sekä -elektrodeissa kulkee vain pieni virta, toisin sanoen niiden maadoitusresistanssit ovat hyvin pieniä. Pienjännitejärjestelmien maadoitusjohtimet ja -elektrodit mitoitetaan yleensä vain mekaanisen ja korroosionkestävyyden mukaan. SFS 6000 edellyttää, että jakeluverkon PEN-johtimen maadoitusimpedanssin arvo täytyy olla pienempi kuin 100 ohmia, mikäli maadoitusolosuhteet sen sallivat. Näin pieni maadoitusvastusarvo parantaa nollatun laitteiston käytön turvallisuutta PEN-johtimen poikkitalanteissa jakeluverkoissa. (Monni 2015, 135; Kauppila ym. 2019, 18, 35 – 36, 128.)

Maadoitusvastusarvolla on merkitystä vikavirtasuojilla varustetuissa järjestelmissä. Taulukko 1 esittää maadoituselektrodin suurimman vastusarvon, erilaisilla vikavirtasuojan nimellisvirroilla, kun kosketusjännite on 50 VAC.

Taulukko 1. Maadoituselektrodin maksimaalinen vastus VVSK:n nimellisvirralla (Chauvin Arnoux 2018, 2).

Max. VVSK:n nimellisvirta (IΔn)		Maadoituselektrodin max. vastus suojamaahan kytkemiseksi (Ohm)
Alhainen herkkyys	20 A	2.5
	10 A	5
	5 A	10
	3 A	17
Keskiherkkyys	1 A	50
	500 mA	100
	300 mA	167
	100 mA	500
Korkea herkkyys	≤ 30 mA	> 500

Maadoitusvastusarvolla on suuri merkitys suurjänniteverkoissa ja muuntamoilla, joilla maadoitusvastusarvolle on annettu tiettyjä raja-arvoja. SFS 6001:n mukaan suurjännitejärjestelmän sekä muuntopiirin maadoituksen riittävä maadoitusvastusarvo mitoitetaan verkko-osan sijainnista, maasulkusuojauksesta ja verkon maasulkuvirrasta riippuen. (Monni 2015, 135; Kauppila ym. 2019, 15, 20, 135.)

3.2.2 Maadoitusvastusarvoon vaikuttavat maadoituselektrodien mitoitukset

Maadoituselektrodilla ja sen liitännällä on pieni vaikutus maadoitusvastusarvoon, koska niiden vastus on yleensä hyvin pieni. Tämä johtuu hyvin johtavista materiaaleista, kuten kuparista tai teräksestä, joista maadoitussauvat yleensä valmistetaan. Ympäröivän maan kosketusvastuksen vaikutus elektrodiin on merkityksellön, jos elektrodi on kunnolla kosketuksessa maan kanssa ja elektrodin pinnalla ei ole muita aineita, kuten rasvaa tai maalia. Itse ympäröivän maan vastuksella on vähän enemmän vaikutusta maadoitusvastusarvoon, joka on suurin elektrodia lähimpänä ja pienenee elektrodista poispäin. Monimutkaiset verkot lisäävät merkittävästi kosketusta ympäröivään maahan, jolloin maadoitusvastus pienenee. (Fluke 2017, 4 – 5.)

Maadoituselektrodien maadoitusvastus voi pienentyä huomattavasti, jos ne asennetaan syvemmälle maahan, varsinkin routarajan alapuolelle. Maadoitusvastus pienenee myös useiden maadoituselektrodien rinnakkaisasennuksissa, jos niiden välin on vähintään yhtä suuri kuin niiden asennussyvyys. Lisäksi maadoituselektrodien pituuden kaksinkertaistaminen voi vähentää maadoitusvastusarvoa jopa 40 %. Maadoituselektrodien halkaisijoiden suurentamisella ei ole niin suurta vaikutusta kuin pituuden kasvattamisella. Maadoituselektrodin halkaisijan kaksinkertaistamisessa sen vastus pienenee vain 10 %. (Fluke 2017, 4 – 5.)


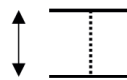






Maadoitusjärjestelmän suunnittelussa on otettava huomioon myös maadoituselektrodin muoto. Taulukko 2 esittää maadoitusvastusarvojen laskentakaavat erityyppiselle maadoituselektrodille.

Taulukko 2. Erityyppisten maadoituselektrodien maadoitusresistanssin laskentakaavoja (SFS 6001:2018 2018, 148).

Elektrodin laatu	Kaava	Huomautukset
Pallo pinnassa	$R_E = \frac{\rho_E}{\pi D}$	
Levy pinnassa	$R_E = \frac{\rho_E}{\pi D}$	$s \ll D$
Pystysuora tanko tai putki pinnassa	$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L} \ln \frac{4L}{1,36 \times d}$	$d \ll L$
Pystysuora tanko tai putki upotettuna	$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L} \ln \frac{4L}{1,36 \times d} \times \frac{2h+L}{4h+L}$	$d \ll L$
Vaakasuora johdin pinnassa	$R_E = \frac{\rho_E}{\pi L} \ln \frac{2L}{1,36 \times d}$	$d \ll L$
Vaakasuora johdin upotettuna	$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L} \ln \frac{L^2}{1,85 \times h \times d}$	$d \ll 4h$
Ruudukko	$R_E = \frac{\rho_E}{2D} + \frac{\rho_E}{L}$	

Taulukko 3 esittää erilaisten elektrodimuotojen vaikutusta maadoitusvastusarvoon, kun elektrodin kokonaispituus ei muuttuu. Maadoituselektrodityypin ja -pituuden tiedossa voidaan arvioida tarvitsevaa maadoitusvastusarvoa.

Taulukko 3. Samalla maadoituselektrodin kokonaispituudella saavutetaan maadoitusresistanssin suhde vaakasuoran johtimen maadoitusresistanssiin (upotussyvyys 0,7 m) (SFS 6001:2018, 149).

Elektrodin pituus L (m)		20	60	200	600
Elektrodin muoto		Maadoitusresistanssin suhde vaakasuoran johtimen maadoitusresistanssiin			
		100	100	100	100
0,2 m		133	144	155	159
2 m		109	123	135	143
20 m		92	98	109	119
		103	103	102	102
		107	106	106	105
		116	115	114	112
		136	135	132	129
		159	158	154	148
		109	108	107	106

3.3 Maaperän resistiivisyys

Maadoituselektrodin muotoon vaikuttaa merkittävästi maaperän ominaisresistanssi. Yleensä maadoitus voidaan toteuttaa pienemmillä maadoituselektrodin pituuksilla vain, jos maaperä on hyvin johtava. Tästä takia maadoituselektrodi kannattaa asentaa maahan, jonka resistiivisyys on mahdollisimman pieni. (Kauppila ym. 2019, 20, 136.)

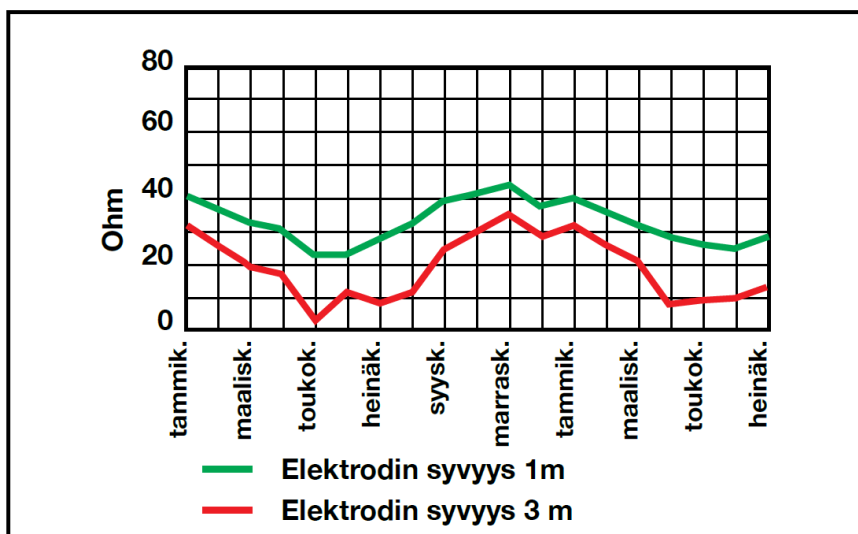
Maaperän resistiivisyys vaihtelee huomattavasti eri paikoissa maaperän muodosta, raekoosta, tiheydestä ja kosteudesta riippuen. Maaperän resistiivisyys p_E ilmaistaan muodossa Ω/m , joka on teoreettinen vastus ohmissa 1 m^2 poikkipinta-ala- ja 1 m pituudelle maasynterille. Taulukossa 4 on esitetty maaperän resistiivisyyden tavalliset vaihteluvälit 50 Hz:n taajuudella. (Chauvin Arnoux 2018, 3; SFS 6001:2018, 121.)

Taulukko 4. Maaperän resistiivisyys 50 Hz taajuudella (normaalit vaihteluvälit) (SFS 6001:2018, 121).

Maaperän tyyppi	Maaperän resistiivisyys ρ_E Ωm
Suoperäinen maa	5 – 40
Savi, hiesu, humus	20 – 200
Hiekka	200 – 2 500
Sora	2 000 – 3 000
Rapautunut kivi	yleensä alle 1 000
Hiekkakivi	2 000 – 3 000
Graniitti	50 000 saakka
Moreeni	30 000 saakka

Maaperä on harvoin homogeenistä ja koostuu erityyppisistä kerroksista. Maaperän kosteuspitoisuus vaihtelee myös vuodenaikojen ja pohjaveden korkeuden mukaan (Fluke 2017, 6). Kuvio 8 esittää maadoitusvastusarvojen vaihtelua eri vuodenaikoina.

Maaperä- ja vesiominaisuudet ovat yleensä vakaampia alhaisissa maan kerroksissa, joten maadoituselektrodit on asennettava niin syväälle kuin mahdollista, eli pohjaveden pinnan korkeudelle. Lumi ja routa heikkenevät maan pinnan johtavuutta sekä lisäävät maadoitusresistanssia, siksi elektrodit kannattaa asentaa tiettyyn syvyyteen, jossa lämpötila on lähes muuttamaton, eli routarajan alapuolelle. (Chauvin Arnoux 2018, 3 – 4; Fluke 2017, 6.)



Kuvio 8. Maadoitusvastusarvojen vaihtelut eri vuodenaikoina (elektrodi on sijoitettu savihiekkamaahan) (Chauvin Arnoux 2018, 4).

Huono maaperän johtavuus vaikuttaa vaakaelektrodeihin, joiden upotussyvyys on yleensä alle 1 metri. Talvisaikaan nämä elektrodit ovat usein routivassa maassa. Vaakaelektrodit voidaan asentaa syvemmälle, eli routarajan alapuolelle. Näin niiden maadoitusresistanssi on vakaampi, koska routa ei pääse vaikuttamaan niihin. (Kauppila ym. 2019, 20, 137 – 138.)

4 MAADOITUSJÄRJESTELMÄT

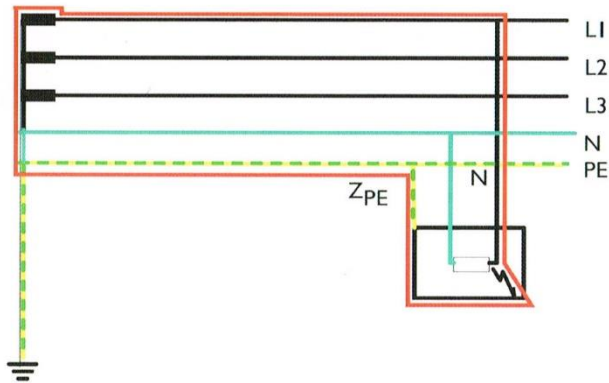
Maadoitusjärjestelmät ovat erilaisten sähköjärjestelmien osia. Pienjännitejärjestelmissä ne liittyvät jakelujärjestelmiin tai koko pienjännitejärjestelmän suojamaadoitus- ja potentiaalintasauksen toimintaan. Suurjännite- ja keskijännitejärjestelmissä maadoitusjärjestelmät ovat monimutkaisia suojamaadoitus- ja potentiaalintasausverkkoja. Muuntamon järjestelmissä niiden tehtävä on muodostaa muuntajan ylä- ja alajännitepuolten välisten järjestelmien yhteissuojaus.

4.1 Pienjännitemaadoitusjärjestelmä

Pienjännitejärjestelmän maadoitustapa riippuu jakelujärjestelmästä, jotka jaetaan TN-, TT- tai IT-järjestelmiksi. Myös jakelujärjestelmien vikasuojaustoiminnot ja niiden toteutus vaihtelevat jakelujärjestelmästä riippuen.

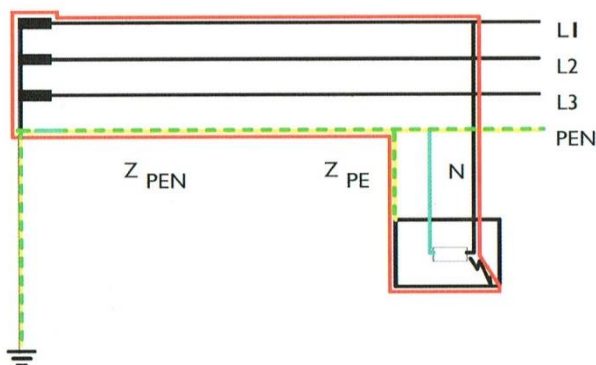
TN-järjestelmä on nykyään eniten käytetty jakelujärjestelmä Suomessa. TN-järjestelmässä on yksi suoraan maadoitettu piste, johon yhdistetään suojamaadoitusjohtimella tai PEN-johtimella sähkölaitteiston jännitteelle alttiit osat. Tässä järjestelmässä syötön nopea poiskytkentä voidaan toteuttaa yleensä ylivirtasuojilla. TN-järjestelmä jaetaan lisäksi TN-S-, TN-C-S- ja TN-C-järjestelmäksi. (Ylinen 2016, 26 – 27.)

TN-S-järjestelmässä erillinen nolla- ja suojamaadoitusjohdin ovat erillään läpi koko järjestelmän (SFS 6000-1:2017, 40). Erillinen nolla- ja suojamaadoitusjohdin mahdollistavat häiriöttömän sähkönsyötön, jolloin järjestelmä sopii parhailaan tietotekniikan laitteistojen toimintaan. Lisäksi erillinen nollajohdin ja suojamaadoitusjohdin mahdollistavat vikavirtasuojien toiminnan. Kuvio 9 esittää vikavirran kulkua TN-S-järjestelmässä. Nykyään kaikkiaan sähköasennuksissa käytetään tätä järjestelmää aina kun se on mahdollista. (Ylinen 2016, 26; Kauppila ym. 2019, 32 – 33.)



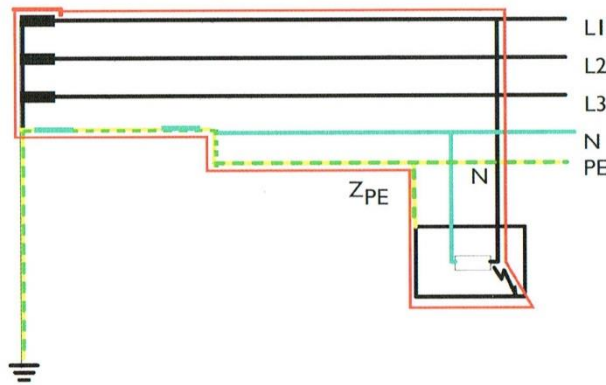
Kuvio 9. TN-S-järjestelmä ja vikavirran kulku TN-S-järjestelmässä (Ylinen 2016, 26).

TN-C-järjestelmässä nolla- ja suojamaadoitusjohtimet on yhdistetty yhdeksi PEN-johtimeksi koko järjestelmässä (SFS 6000-1:2017, 41). Järjestelmän yhdysjohdin aiheuttaa häiriövikoja, siksi järjestelmän käyttö ei ole järkevää tietotekniikan laitteistojen verkoissa. Järjestelmän suurin haitta on PEN-johtimen katko, joka aiheuttaa jännitteelle alttiiden osien tulemistä jännitteisiksi. Tätä vaara pienennetään käyttämällä PEN-johtimen poikkipinta-alana vähintään 10 mm² kuparia tai 16 mm² alumiinia, jotta PEN-johtimen sisäinen impedanssi olisi riittävä pieni. Kuvio 10 esittää vikavirran kulkua TN-C-järjestelmässä. Jakeluverkot ovat TN-C-järjestelmän mukaisia, toisin kuin rakennusten sähköasennukset uudisasennuksissa yleensä TN-S-järjestelmän mukaisia. (Ylinen 2016, 26 – 27; Kauppila ym. 2019, 32 – 33.)



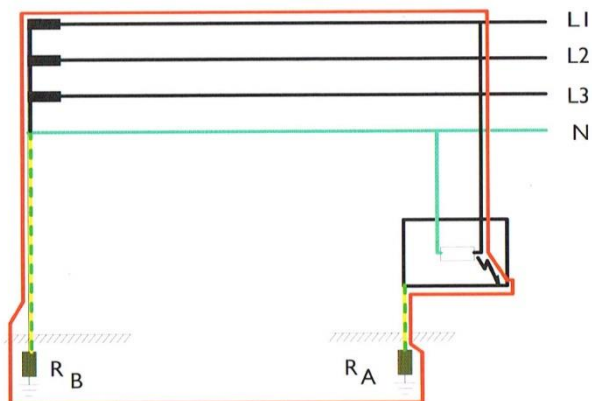
Kuvio 10. TN-C-järjestelmä ja vikavirran kulku TN-C-järjestelmässä (Ylinen 2016, 27).

TN-C-S-järjestelmässä nolla- ja suojamaadoitusjohtimet on yhdistetty yhdeksi PEN-johtimeksi vain järjestelmän osassa (Kuvio 11) (SFS 6000-1:2017, 40 – 41). Järjestelmää käytetään aika usein koko pienjänniteverkossa. (Ylinen 2016, 26; Kauppila ym. 2019, 32.)



Kuvio 11. TN-C-S-järjestelmä ja vikavirran kulku TN-C-S-järjestelmässä (Ylinen 2016, 27).

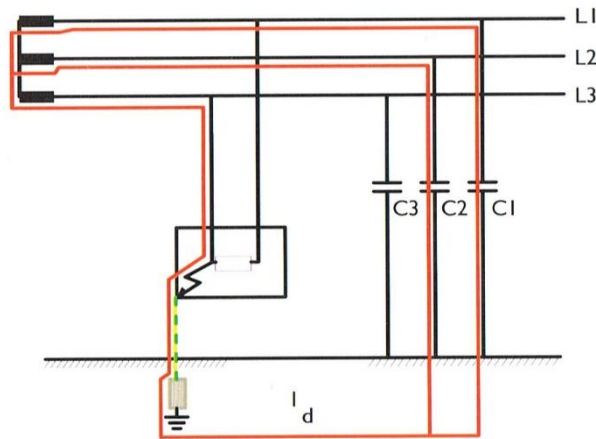
TT-järjestelmässä yksi piste maadoitetaan suoraan, ja sähkölaitteiston jännitteelle alttiit osat yhdistetään jakelujärjestelmän maadoituselektrodeista sähköisesti riippumattomiin erillisiin maadoituselektrodeihin (Kuvio 12) (Ylinen 2016, 29; SFS 6000-1:2017, 43).



Kuvio 12. TT-järjestelmä ja vikavirran kulku TT-järjestelmässä (Ylinen 2016, 29).

IT-järjestelmässä ei ole yhtään jännitteistä osaa, joita yhdistetään suoraan maahan, vaan sähkölaitteiston jännitteelle alttiit osat yhdistetään suoraan maahan, yleensä ilman nollajohtimen käyttöä (Kuvio 13) (Ylinen 2016, 29 – 30; SFS 6000-1:2017, 45 – 46). IT-järjestelmiä käytetään yleensä sairaaloissa ja teollisuudessa,

joissa ensimmäinen järjestelmän vika ei saa aiheuttaa käyttökeskeytystä. IT-järjestelmää voidaan käyttää TN-S-järjestelmän sijaan UPS-järjestelmissä tai erillisen muuntajan tietotekniikan laitteistojen syöttöön käytössä. (Ylinen 2016, 29 – 30; Kauppila ym. 2019, 33.)



Kuvio 13. IT-järjestelmä ja vikavirran kulku IT-järjestelmässä (Ylinen 2016, 29).

4.2 Suurjännitemaadoitusjärjestelmä

Suurjännitemaadoitusjärjestelmät voidaan jakaa 110 kV-, 220 kV- ja 400 kV- järjestelmiksi sekä myös ≤ 45 kV keskijännitelaitteistojen järjestelmäksi, jota käytetään sähköjakeluverkkojen suurjännitteinä asiakkaiden sähköjakelussa (Kauppila ym. 2019, 49). Tässä opinnäytetyssä käsitellään vain viimeistä tapaa. Sellaisessa järjestelmässä maadoitusrakenne toteutetaan eri tavalla: maadoituselektrodit liitetään yhteen esimerkiksi rinnalle tai laajaa maadoitusjärjestelmää käyttämällä.

4.2.1 Yhteen liitetty maadoitusjärjestelmä

Yhteen liitettyssä maadoitusjärjestelmässä maadoitukset ovat yhteydessä toisiinsa ketjumaisesti tai silmukkamaisesti. Maadoitusjärjestelmää käytetään yleensä maahan asennetussa sähköjakeluverkoissa kaupunkien keskustoissa sekä nykyään useimmiten myös taajamissa ja haja-asutusalueilla. Ketjuuntuville järjestelmissä yhdistysjohtimilla liitettyjen kahden tai muutaman maadoituselektrodien impedanssiarvo on merkittävästi pienempi kuin tietyn muuntopiirin oma maadoitusimpedanssi. Maadoitusjärjestelmä ei riitä täyttämään laajan maadoi-

tuksen vaatimuksia, siksi sen maadoitusresistanssin riittävän pienen arvon suuruus on aina määriteltävä asennuksen yksityiskohdista riippuen. (Kauppila ym. 2019, 71 – 72.)

4.2.2 Laaja maadoitusjärjestelmä

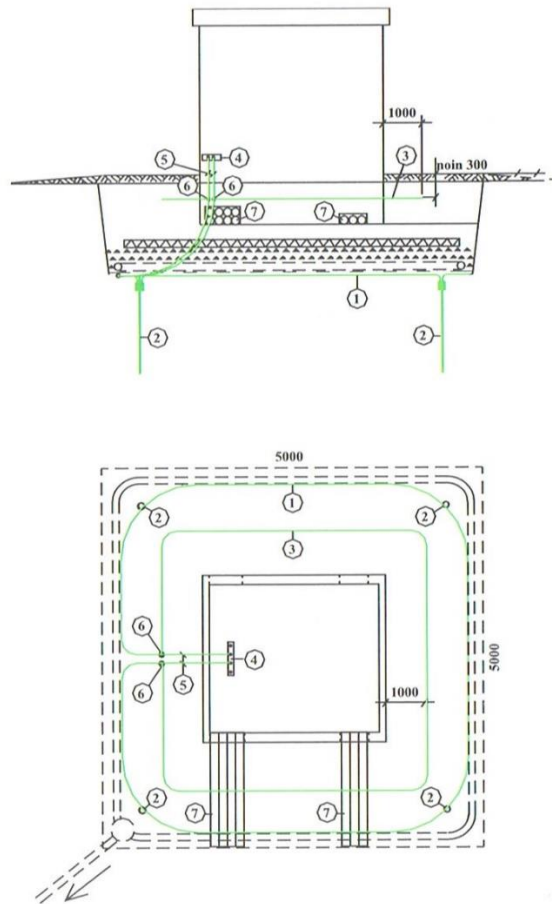
Laajan maadoitusjärjestelmän tavoitteena on eliminoida alueiden potentiaalierot kokonaan tai vähentää niiden määrä vain vähäisiin potentiaalieroihin. Laajassa maadoitusjärjestelmässä useat paikalliset lähellä toisiaan olevat maadoitusjärjestelmät liitetään verkkomaisesti yhteen, jolloin järjestelmä muodostaa lähes tasapotentiaalipinnan eikä kyseisellä alueella esiinny vaarallista kosketusjännitettä. (Ylinen 2016, 64.)

Suomessa laajaa maadoitusjärjestelmää käytetään tyypillisesti tiheästi asutuissa kaupunkikeskustoissa. Samoin niitä käytetään laajoilla teollisuusalueilla, joilla on muuntamoita tiheänä verkkona. Kunkin muuntamon maadoitukset on yhdistetty vähintään kahden muun muuntamon maadoituksiin ja myös muulla tavalla, esimerkiksi muun jänniteverkon kautta. Uutta muuntamoa rakennettaessa laajan maadoitusjärjestelmän alueelle maadoitusimpedanssia ei yleensä mitata. Kuitenkin, ennen käyttöönottoa mittauksien avulla on tarkistettava luotettava liittyminen laajaan maadoitusjärjestelmään. (Ylinen 2016, 65; Kauppila ym. 2019, 70.)

4.3 Muuntamon maadoitus

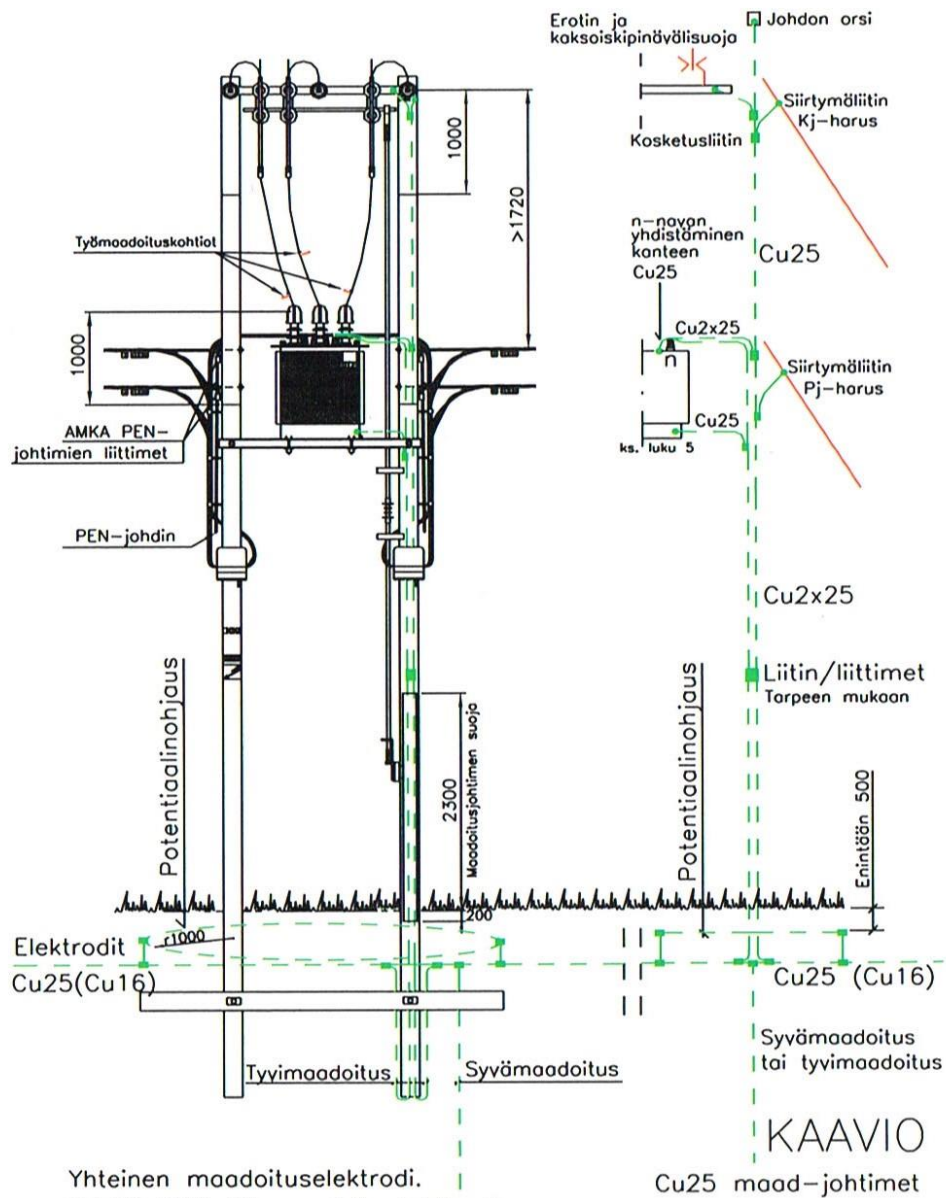
Muuntamoilla suurjännitepuolen maadoitukset on liitettävä, jos on mahdollista, yhteen pienjännitepuolen maadoitusten kanssa. Muuten tehdään erilliset maadoitukset, joiden vikasuojaus on hyvin hankala toteuttaa. Muuntajan pienjännite-maadoitukset yleensä liittyvät TN-järjestelmään. Lisäksi muuntajan maadoituksiin yhdistetään potentiaalinojauselektrodin, jos maadoitusimpedanssiarvo ei täytä minimivaatimuksia. (Kauppila ym. 2019, 41, 55, 67.) Puistomuuntamoilla maadoituselektrodi sijoitetaan perustuksen pohjalle ja kytketään suojamaadoitusjohtimen kautta maadoituskiskoon (Kuvio 14).

1. Maadoituselektrodi Cu 25
2. Pystymaadoitus
3. Potentialinohjauselektrodi Cu 25
4. Muuntamon maadoituskisko
5. Maadoitusjohtimet Cu 25
6. Potentialinohjauksen liitos
7. Kaapeliputkitus



Kuvio 14. Puistomuuntamon maadoitus (Kauppila ym. 2019, 66).

Pylväsmuuntamolla suurjännitteen suojamaadoitusjohdin sekä n-navasta lähtevä johdin asennetaan pylvästä pitkin suoraan maahan. Lisäksi muuntajan n-napaan tuodaan haara suojamaadoitusjohtimesta. (Kauppila ym. 2019, 67.) Kuviossa 15 on esitetty muut pylväsmuuntamon maadoitukset.



Kuvio 15. Pylväsmuuntamon maadoitukset (Kauppila ym. 2019, 67).

5 MAADOITUSJÄRJESTELMILLE ASETETUT VAATIMUKSET

Maadoitusjärjestelmille asetetut vaatimukset sisältävät monia tekijöitä, jotka riippuvat maadoitusjärjestelmän tyypistä ja rakenteesta. Kuitenkin jokaisella maadoitusjärjestelmällä on yhteisiä minimivaatimuksia, joita on noudettava maadoitusjärjestelmän suunnittelussa tai mitoituksessa.

Maadoitusjärjestelmän mitoituksessa, jännitetasolta riippuen, otetaan huomioon seuraavat tekijät:

- vikavirran suuruus
- vian kesto aika
- maaperän ja maadoituselektrodin ominaisuudet (SFS 6001:2018, 87).

Vikavirtojen ja niiden raja-arvojen avulla määritellään turvallisia askel- ja kosketusjännitteitä, jotka ovat turvallisuuskriteereiden osia. Toiminnalliset vaatimukset koostuvat maadoitusjärjestelmän komponenttien termisistä ja mekaanisista turva-arvoista sekä korroosion ja mekaanisten rasitusten vaikutuksista. (SFS 6001:2018, 87 – 88.)

5.1 Korroosiokestävyys ja mekaaninen lujuus

Maadoituselektrodin asentamiseen maahan elektrodin pinnalle vaikuttavat monet vaurioitumistekijät, muun muassa kemiallinen tai biologinen syöpyminen, hapettuminen, elektrolyyttiparin muodostuminen, elektrolyysi ja muut tekijät, jotka heikentävät elektrodin maadoitusominaisuuksia. Jotta maadoituselektrodit noudettavat toiminnallisia vaatimuksia koko elinkaaren aikana, ne on valmistettava korroosion kestävästä materiaaleista. Myös niiden valmistuksessa on otettava huomioon mekaanisten rasitusten kestävyysarvo, joka pysyy ennallaan asennuksen sekä normaalikäytön aikana. Lisäksi betoniperustuksiin upotettu teräksen ja teräspaalojen tai muiden luonnollisten maadoituselektrodien käyttö parantaa maadoitusjärjestelmän maadoitusarvoa, jos niitä on käytetty maadoitusjärjestelmän osina. (SFS 6001:2018, 88.)

Pienjännitemaadoitusjärjestelmän ei maahan upotetun maadoitusjohtimen minimipoikkipinta-ala on vähintään 6 mm² kuparia tai 50 mm² terästä. Jos maadoitusjohdin on upotettu maahan, sen poikkipinta-alan on kuitenkin noudatettava pienjännite-elektrodille annettuja vaatimuksia. Alumiinijohtimia ei saa käyttää maadoitusjohtimina pienjännitemaadoitusjärjestelmissä. (Kauppila ym. 2019, 37.) Taulukossa 5 on esitetty pienjännitemaadoituselektrodien minimimitat mekaanisen lujuuden ja korroosionkestävyyden perusteella.

Taulukko 5. Pienjännite-elektrodin minimimitat (SFS 6000-5-54:2017, 8; Kauppila ym. 2019, 35).

Materiaali	Poikkipinta-ala mm ²	Halkaisija Ø mm	Minimipaksuus mm ^a	Korroosiosuojauskerroksen paksuus µm
Kupari	16		1,6	–
Kuumasinkitty teräs	90	10	3	45
Ruostumaton teräs	90	10	3	–
Betoniin upotettu teräs	90	10	3	– ^b
Kuparivaipalla varustettu teräs		15		2000
Sähköisesti kuparilla päällystetty teräs		14 (vaaka-tasossa 10)		250 (vaaka-elektrodilla 70)
a Nauhan tai levyn paksuus tai köyden yksittäisen langan halkaisija Ø				
b Betoniin upotetulla perustusmaadoituselektrodilla ei tarvita korroosiosuojausta				

Maadoitusjohtimien sekä potentiaalintausjohtimien mekaanisen lujuuden ja korroosionkestävyyden perusteella vähimmäispoikkipinnat suurjännitejärjestelmässä ovat

- 16 mm² (kupari)
- 35 mm² (alumiini)
- 50 mm² (teräs) (SFS 6001:2018, 88).

Taulukossa 6 on esitetty suurjännitemaadoituselektrodien minimimitat mekaanisen lujuuden ja korroosionkestävyyden perusteella.

Taulukko 6. Suurjännite-elektrodin minimimitat (SFS 6001:2018, 108; Kauppila ym. 2019, 57).

Materiaali		Elektrodin tyyppi	Vähimmäismitta				
			Ydinosa			Pinnoite/vaippa	
			Halkai- sija	Poikki- pinta	Pak- suus	Yksit- täinen arvo	Keski- arvo
			mm	mm ²	mm	µm	µm
Teräs	Kuumasinkitty	Nauha b		90	3	63	70
		Profiili (ml. levy)		90	3	63	70
		Putki	25		2	47	55
		Sauvaelektrodin pyörötanko	16			63	70
		Vaakamaadoitus- elektrodin pyöreä lanka	10				50
	Lyijyvaipalla a	Vaakamaadoitus- elektrodin pyöreä lanka	8			1 000	
	Päällystetyllä kuparivaipalla	Sauvaelektrodin pyörötanko	15			2 000	
	Elektrolyytti- kuparivaipalla	Sauvaelektrodin pyörötanko	14,2			90	100
Kupari	Paljas	Nauha		50	2		
		Vaakamaadoitus- elektrodin pyöreä lanka		25 c			
		Köysi	1,8 d	25 c			
		Putki	20		2		
	Tinattu	Köysi	1,8 d	25 c		1	5
	Sinkitty	Nauha		50	2	20	40
	Lyijyvaipalla a	Köysi	1,8 d	25 c		1 000	
		Pyöreä lanka		25 c		1 000	
a Ei sovellu asennettavaksi suoraan betoniin. Lyijyn käyttöä ei suositella ympäristösyistä.							
b Valssattu tai leikattu nauha pyörästetyn reunoin.							
c 16 mm ² poikkipintaa voidaan käyttää erityisolosuhteissa, joissa kokemuksen mukaan korroosion ja mekaanisen vaurioitumisen riski on vähäinen.							
d Yksittäiselle langalle.							

5.2 Terminen lujuuden kestävyys

Koska suurjännitejärjestelmissä kulkeva vikavirta on huomattavasti suurempi kuin pienjännitejärjestelmissä, suurjännitemaadoitusten suunnittelussa on mitoitettava termistä lujuuden kestävyyttä. Termistä lujuutta lasketaan vikavirran suuruuden ja vian kestoajan avulla. Alle 5 sekuntia kestävillä vikavirroilla maan alkulämpötilana olevana 20 °C maadoitusjohtimen tai maadoituselektrodin poikkipinta lasketaan kaavan 1 mukaan.

$$A = \frac{I}{K} \sqrt{\frac{t_f}{\ln \frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}}} \quad (1)$$

missä

A	on	poikkipinta [mm ²]
I	on	johtimen virran tehollisarvo [A]
t_f	on	vikavirran kesto aika [s]
K	on	virrallisen osan materiaalista riippuva vakio; taulukossa 7 on esitetty arvot yleisimmille materiaaleille olettaen alkulämpötilan olevan 20 °C
β	on	virrallisen osan resistanssin lämpötilakertoimen käänteisarvo lämpötilassa 0 °C; taulukossa 7 on esitetty lämpötilakertoimet
θ_i	on	alkulämpötila [°C]; yleensä on 20 °C
θ_f	on	loppulämpötila [°C] (SFS 6001:2018, 109).

Maadoitusjärjestelmässä kulkeva vikavirran laskenta-arvo riippuu mitoitettavan johtimen ominaisuuksista sekä suurjännitejärjestelmän maadoitustavasta. Järjestelmissä käytettävät virrat lasketaan taulukon 8 kaavojen mukaan.

Taulukko 7. Materiaalivakiot (SFS 6001:2018, 109).

Materiaali	β [°C]	$K [A \times \sqrt{s} / \text{mm}^2]$
Kupari	234,5	226
Alumiini	228	148
Teräs	202	78

Liitteessä 1 on esitetty muut vikavirran laskennassa tarvitsevat arvot ja kaavat sekä myös esimerkkikäyrät. Käyrissä on esitetty miten vikavirran erilaiset arvot muuttuvat maadoituselektrodien materiaalista, poikkipinta-alalta, tyypistä sekä ympäröivän maan lämpötilasta ja vikavirran kestoajalta riippuen.

Taulukko 8. Maadoitusjärjestelmien suunnitteluun liittyvät olennaiset virrat (SFS-EN 50522 taulukko 1) (SFS 6001:2018, 90).

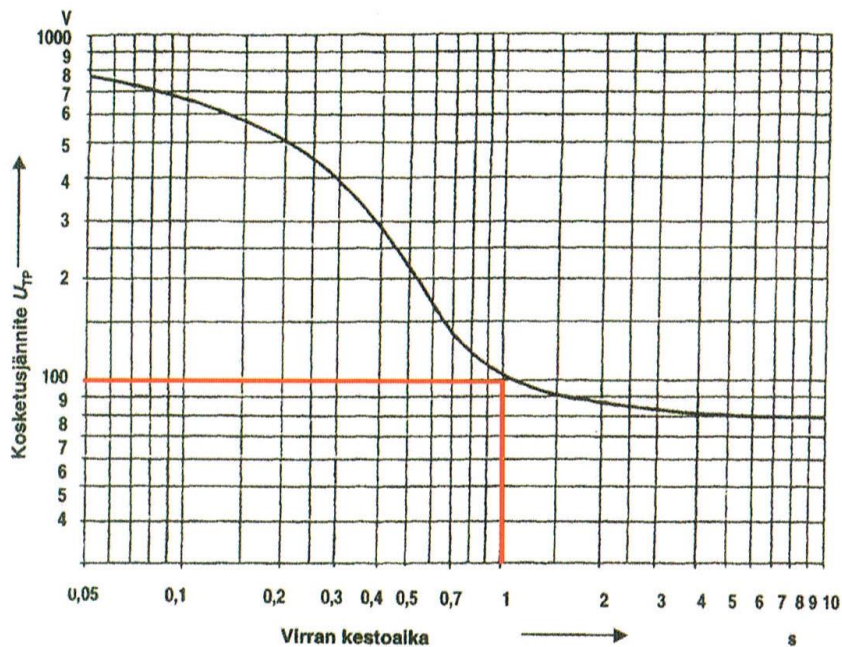
Suurjännitejärjestelmän tyyppi		Termiseen kuormitukseen liittyvä virta ^{a e}		Maadoitusjännitteeseen ja kosketusjännitteisiin liittyvä virta
		Maadoituselektrodi	Maadoitusjohdin	
Maasta erotetut järjestelmät				
		$I''_{KEE}{}^i$	$I''_{KEE}{}^i$	$I_E = r \cdot I_C{}^b$
Sammutetut järjestelmät				
Sisältäen lyhytaikaisen maadoittamisen vianilmaisua varten				
	Järjestelmät ilman sammutuskeloja ^f	$I''_{KEE}{}^i$	$I''_{KEE}{}^i$	$I_E = r \cdot I_{RES}{}^b$
	Järjestelmät, joissa on sammutuskelat	$I''_{KEE}{}^i$	$I''_{KEE}{}^{ci}$	$I_E = r \cdot \sqrt{I_L^2 + I_{Res}^2}{}^{b h}$
Pienen impedanssin kautta maadoitetut järjestelmät				
Sisältäen lyhytaikaisen maadoittamisen laukaisua varten ^g				
	Järjestelmä, jossa ei ole tähtipisteen maadoitusta	I''_{k1}	I''_{k1}	$I_E = r \cdot I''_{k1}$
	Järjestelmä, jossa on tähtipisteen maadoitus	I''_{k1}	I''_{k1}	$I_E = r \cdot (I''_{k1} \cdot I_N) {}^d$
^a Jos virralla on useita kulkuteitä, virran jakautuminen voidaan ottaa huomioon.				
^b Jos maasuluille ei ole automaattista poiskytkentää, kaksoismaasulkujen huomioon ottamisen tarve riippuu käyttökokemuksista.				
^c Petersenin kelan eli maasulkuvirran sammutuskelan maadoitusjohdin pitää mitoittaa kelan maksimivirran mukaan.				
^d On tarkistettava, voiko aseman ulkopuolinen vika olla määräävä.				
^e Liitteen C mukaiset vähimmäispoikkipinnat pitää ottaa huomioon.				
^f Jos järjestelmä ei ole riittävän hyvin kompensoitu, yleistä arvoa 10 % arvosta I_C ei voi soveltaa. Jäännösvirran reaktiivinen/kapasitiivinen komponentti on lisäksi otettava huomioon.				
^g Sammutetuissa järjestelmissä oletetaan, että lyhytaikainen maadoittaminen (vastuksen kytkeminen sammutuskelan rinnalle) alkaa automaattisesti 5 s kuluttua maasulun havaitsemisesta.				
^h Kun vika sattuu sähköasemalla, pitää ottaa huomioon kapasitiivinen vikavirta I_C . Jos sähköaseman ulkopuolisessa verkossa on muita sammutuskeloja, ne pitää ottaa huomioon.				
ⁱ [F] Maasta erotetuissa ja sammutetuissa verkoissa, joissa maasulku kytketään pois alle 1 sekunnissa, suuretta I_C voidaan käyttää maadoituselektrodien ja -johtimien termisen kuormitettavuuden mitoituksessa määräävänä tekijänä. Tällöin maasulun poiskytkentäaikana käytetään ekvivalenttista poiskytkentäaikaa. [F]				
Selitykset:				
I_C	Laskettu tai mitattu kapasitiivinen maasulkuvirta			
I_{RES}	Maasulun jäännösvirta (katso kuva 3b). Jos tarkkaa arvoa ei ole käytettävissä, arvoksi voidaan olettaa 10 % arvosta I_C .			
I_L	Kyseessä olevan sähköaseman rinnakkaisten sammutuskelojen nimellisvirtojen summa			
I''_{KEE}	Standardin SFS-EN 60909 mukaisesti laskettu kaksoismaasulkuvirta. Virran I''_{KEE} maksimiarvon voidaan olettaa olevan 85 % symmetrisen alkuaikavirran arvosta			
I''_{k1}	Standardin SFS-EN 60909 mukaan laskettu yksivaiheisen symmetrisen maasulkuvirran alkuarvo			
I_E	Maavirta (katso kuva 2)			
I_N	Muuntajan tähtipistevirta (katso kuva 2)			
r	Reduktiokerroin (katso liite I)			
Jos asemalta lähtevillä ilmajohtoilla ja kaapeleilla on erilaiset reduktiokertoimet, tulee tarvittava resultoiva virta määrittää liitteen L mukaisesti.				

5.3 Maadoitus-, kosketus- ja askeljännite

Maasulun vikatapauksessa maasulkuvirta kulkee maadoituksen kautta ja hajaantuu maahan sekä aiheutuu maadoitusresistanssin jännitehäviön eli maadoitusjännitteen. Suojamaadoitetussa laitteessa maadoitusjännite muuttuu kosketusjännitteeksi, jonka suuruus on osa maadoitusjännitteestä. Kosketusjännite on ih-

misen keholla samanaikaisesti kosketeltava kahden osan tai kohdan välinen jännite. (Monni 2015, 133.) Kosketusjännitteen arvo voi olla kaksi tai neljä kertaa pienempi kuin maadoitusjännitteen arvo (Kauppila ym. 2019, 135). Kahden jaloin kosketeltavan kohdan välillä esiintyvää jännitettä nimetään askeljännitteeksi (Monni 2015, 134).

Suurjännitejärjestelmille on asennettu suurimmat sallitut maadoitus- ja kosketusjännitteet SFS 6001:n mukaan. Sallitut järjestelmän jännitteet arvot voidaan määrittää mittaamalla ja laskemalla. Suurjännitejärjestelmässä suurin sallittu kosketusjännite U_{TP} riippuu vikavirran kestoajalta (Kuvio 16).



Kuvio 16. Sallitut kosketusjännitteet virran kestoajan funktiona (SFS 6001:2018, 93; Kauppila ym. 2019, 136).

Suurin sallittu maadoitusarvo määritetään suuriman sallitun kosketusjännitteen perustella, maadoitusasennuksista riippuen. Taulukossa 9 on esitetty SFS 6001:n mukaiset kosketusjännitteiden enimmäisarvot. Suurin sallittu maadoitusarvo voidaan laskea jakamalla maadoitusjännitettä vikavirran arvolla Ohmin lain mukaan. Muuntamoilla, joilla on vain yksi maadoitus, maadoitusjännitteen on noudatettava seuraavaa ehtoa:

$$U_E \leq U_{TP} \quad (2)$$

missä

U_E on maadoitusjännite

U_{TP} on sallittu kosketusjännite käyrältä kuviosta 16 (Kauppila ym. 2019, 55).

Kun pienjänniteverkolla on useita maadoituksia, eli kyseessä on maadoitus muuntamalla ja jokaisella yli 200 metriä pitkällä johtohaaralla sekä liittymissä, SFS 6000 -standardin mukaisessa järjestelmässä maadoitusjännitteen on oltava

$$U_E \leq 2 \times U_{TP} \quad (3)$$

Edellistä tasoa saavutetaan yleensä taajamissa. Lisäksi, jos maadoitusimpedanssi täyttää sille asetetut ehdot, potentiaalinhjauselektrodien rakentaminen ei ole välttämätöntä. (Kauppila ym. 2019, 55, 138.)

Huonossa johtavassa maaperässä tiettyjen vaatimusten samanaikaisesti noudattamisessa, kosketusjännitteen kerroin saa olla arvoltaan 4 seuraavan kaavan mukaisesti:

$$U_E \leq 4 \times U_{TP} \quad (4)$$

Yksittäisien rakennuksien tai sähkölaitteistojen syötettäessä ja kaikkien tiettyjen vaatimuksien noudattamisessa, kosketusjännitteen kerroin saa olla arvoltaan 5 seuraavan kaavan mukaisesti:

$$U_E \leq 5 \times U_{TP} \quad (5)$$

Jakeluverkkoyhtiöt voivat antaa omat maadoitusvaatimukset omille verkoille, joilla maadoitusjännite U_E voi olla suurempi kuin suurin sallittu kosketusjännitteen loppuarvo edellisissä esimerkeissä. Yleensä maadoitusjännite voi olla kaksi tai neljä kertaa suurempi kuin sallittu kosketusjännite. Tämä johtuu tietyn keskijänniteverkon suunnittelusta, jossa on otettu huomioon sekä nykyiset että myös tulevat vaikutukset verkkoon, minkä takia verkon sallitut jännitearvot muuttuvat.

Varsinkin maaseudulla, kun maadoitusolosuhteet ovat huonot, maadoitusjännitteelle annetaan suurempia arvoja. Näissä tapauksissa muuntamoille rakennetaan potentiaalinohjaus ja jokaisen johtohaaran päässä tai johtohaaran läheisyydessä sijaitsee maadoitus. Kuitenkin, maadoitusjännitteen suurempi arvo edellyttää SFS 6001:ssa annettujen ehtojen noudattamista. (Kauppila ym. 2019, 55, 135.)

Taulukko 9. Sallittujen kosketusjännitteiden enimmäisarvot U_{TP} (SFS 6001:2018, 103; Kauppila ym. 2019, 146).

Laukaisuaika / s	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	2,0	5,0	10,0
Kosketusjännite / V	390	280	215	160	132	120	110	102	85	80	80

Joillekin, 90-luvulla, ennen standardin SFS 6001 voimaan tulemistä rakennetuille vanhoille maadoitusryhmille, oli määritetty taulukossa 10 esitetyt maadoitusjännitteen suurimmat sallitut vaatimukset. Taulukon 10 maadoitusjännitteen enimmäisarvot olennaiselta osalta olivat voimassa vuodesta 1974 lähtien 10.8.2015 saakka, kun maadoitusryhmien sisältävä standardi SFS 6001+A1+A2 oli kumottu. (Monni 2015, 133.)

Taulukko 10. Maadoitusjännitteen enimmäisarvot (Monni 2015, 134).

Ryhmä	Maadoitusjännite V	
	Maasulku kytketään itsetoimivasti pois ajassa t (s)	maasulkua ei kytketä itsetoimivasti pois
a	$750/\sqrt{t}$	125
b	$2000/\sqrt{t}$	250
c	$3000/\sqrt{t}$	400
d	$500/\sqrt{t}$	100
e1	$750/\sqrt{t}$	125
e2	$1000/\sqrt{t}$	150

Maadoitusryhmät jaotellaan vaarallisuuden kannalta eri ryhmiin seuraavasti:

- a. Laitteiston suojamaadoitettu osa sekä paljas maadoitusjohdon tai sen maadoitukseen muuten johtavassa yhteydessä oleva metalliosan, kuten rataiskun tai metalliputkiston on oltava kosketeltavissa (kosketusetäisyydellä) maasta, johtavalta lattialta tai vastaavalta alustalta. Tähän ryhmään

kuuluvat muun muassa moottoriohjattu erotinasema tai kaapelipäätepylväs.

- b. Laitteiston suojamaadoitettua osaa sekä paljasta maadoitusjohtoa tai maadoitukseen muuten johtavassa yhteydessä oleva metalliosaa, joka on kosketeltavissa muualta kuin maasta, johtavalta lattialta tai vastaavalta alustalta tai maahan muuten johtavassa yhteydessä olevaa toista metalliosaa, voi samanaikaisesti koskettaa vain esimerkiksi pylvääseen noustessa kuten pylväsmuuntamolla, mutta ei maasta, lattialta tai vastaavalta alustalta. Tähän ryhmään kuuluu esimerkiksi erillismaadoitettu pylväsmuuntamo.
- c. Maanpinnan alapuolella sijaitseva maadoituselektrodi.
- d. Laitteiston suojamaadoitettu osa ja enintään 1000 V:n järjestelmän käyttömaadoitukseen yhdistetty osa silloin, kun näiden maadoittamiseen käytetään yhteistä elektrodia. Tähän ryhmään kuuluu muun muassa muuntamo, joissa on yhdistetty maadoitus.
- e. Enintään 1000 V:n järjestelmän nollattu tai muuten suojamaadoitettu osa, joka on alttiina yli 1000 V:n järjestelmän jännitteelle, kun käytössä on yhteispylväsasennus (alaryhmä e1) tai ilman yhteispylväsasennusta (alaryhmä e2) (Monni 2015, 133).

6 MAADOITUSARVOJEN MITTAUKSET

Maadoitusarvojen mittauksia on suoritettava sekä jo maadoitusjärjestelmän suunnitteluvaiheessa että myös myöhemmin käyttöönoton yhteydessä tai määräjain tehtävissä tarkastuksissa maadoitusasennuksista riippuen. Pienjännitejärjestelmissä yksittäisten maadoituselektrodien maadoitusvastusarvoja ei tarvitse erikseen mitata, muuten TN-järjestelmän elektrodien maadoitusvastusarvon pitäisi olla alle 100 Ω (Monni 2015, 131). Myös laajaa maadoitusjärjestelmää ei yleensä mitata, paitsi laajaan maadoitusjärjestelmään uusien osien liittymistilanteista, joissa maadoitusvastusarvon on mitattava (Kauppila ym. 2019, 147). Uuden maadoitusjärjestelmän suunnitteluvaiheessa vaadittu maadoitusvastusarvo on riippuvainen alueen maaperän johtavuudesta, siksi maadoitusvastusarvon mittauksen lisäksi yleensä suoritetaan myös maaperän resistiivisyyden mittaus.

Paljon kosteutta ja suoloja sisältävät maa-ainekset ovat syövyttäviä ja ne voivat ajan myötä korkeissa lämpötiloissa heikentää maadoituselektrodeja ja niiden liittäntöjä, jolloin maadoitusjärjestelmän maadoitusvastusarvo voi kasvaa ajan myötä. Maadoitusvastusarvon yli 20 %:n kasvussa, vastusarvon on yleensä pienennettävä maadoituselektrodien vaihtamalla, korjaamalla, lisäämällä tai muilla toimenpiteillä. Maadoitusvastusarvon mahdollinen kasvu tarkistetaan enintään 6 – 12 vuoden välein osana laitteiston kunnossapito-ohjelmaa tai kerran vuodessa osana ennakoivaa kunnossapitosuunnitelmaa, maadoitusjärjestelmän rakenteesta ja luotettavuudesta riippuen. (Fluke 2017, 2; Kauppila ym. 2019, 147.)

Maadoitusvastusarvon on mitattava heti roudan sulamisen jälkeen, varsinkin, jos kyseessä on talvella rakennettu muuntopiirin maadoitus (Monni 2015, 131; Kauppila ym. 2019, 147). Kunnossapito-ohjelmaan liittyvät maadoitusvastusarvon välitarkastukset suositellaan tekemään roudattomana aikana, jotta lisäresistanssien mahdollinen vaikutus tuloksiin olisi mahdollisimman pieni. Maadoitusvastusarvon- ja maaperän resistiivisyyden mittaukset voidaan suorittaa eri menetelmillä. Mittauslaitteet ovat myös erilaisia ja niiden ominaisuuksien on täytettävä tietyt standardit.

6.1 Mittalaitteet

Mittalaitteet mittaavat maadoitusarvon yleensä vaihtojännitteellä, koska maaperän polarisoitumisen johdosta tasajännitettä ei pysty käyttämään. Mittalaitteen mittaustaajuus poikkeaa yleensä 50 Hz:n verkkotaajuudesta, muuten verkkotaajuiset häiriöt voivat vaikuttaa mittaustulokseen. Mittalaitteen mittaustarkkuus riippuu sekä itse laitteen ominaisuuksista että käytetystä mittaustavasta. Yleensä mittalaitteen ja mittaussuunnitelmien mittaustarkkuudet on ilmoitettu mittarin ohjeissa. (Kauppila ym. 2019, 152.)

Mittalaitteet ovat mittajohtimia käyttäviä tai johdottomia, pihtiampeerimittarin kaltaisia. Nykyisin on paljon mittareita, joilla voidaan mitata sekä mittajohtimien että pihtimittarien avulla tai käyttää niitä samanaikaisesti, jolloin samalla mittarilla voidaan suorittaa erilaisia mittaussuunnitelmia.

Markkinoilla on useita mittalaitteita erilaisilta valmistajilta kuten Chauvin Arnoux, Fluke, Megger. Laitteet ovat akku-, paristo- tai verkkojännitekäyttöisiä. Laitteet yleensä jaetaan maadoitusmittareiksi ja maadoitusten testauslaitteiksi. Sekä maadoitusmittarit että maadoitusten testauslaitteet mittaavat maadoituksia. Kuitenkin, maadoitusten testauslaitteiden käyttö soveltuu yleisesti vain kuntotarkastuksissa, eikä niitä voi luotettavasti käyttää esimerkiksi laajan maadoitusjärjestelmän testaukseen. (Monni 2015, 142.) Yleensä maadoitusten testauslaitteet ovat pihtiampeerimittarin kaltaisia ja niissä on joko yksi iso tai kaksi erillistä, pienempää pihtiä.

Jakeluverkon maadoitusmittaukseen mittareiden on täytävä seuraavia yleisiä ominaisuuksia:

- Mittalaite on standardin EN 61010 ja IEC 61557 mukainen.
- Mittalaitteen mittaustaajuus on 128 Hz tai sen arvo on valittava niin, että se poikkeaa verkon 50 Hz:n taajuudesta, joten verkkovirta tai verkon yliaallot eivät pääse sotkemaan mittaustulosta.
- Mittalaitteella voidaan mitata maadoitusvastuksen lisäksi myös maan ominaisresistansseja.

- Mittalaite varustetaan 200 m:n ja 40 m:n pituisilla mittajohtimilla.
- Mittalaitteen luotettavuus on testattu ja mittari on kalibroidu aika ajoin toiseen mittalaitteeseen vertaamalla (Monni 2015, 136).

6.2 Maaperän resistiivisyyden mittaus

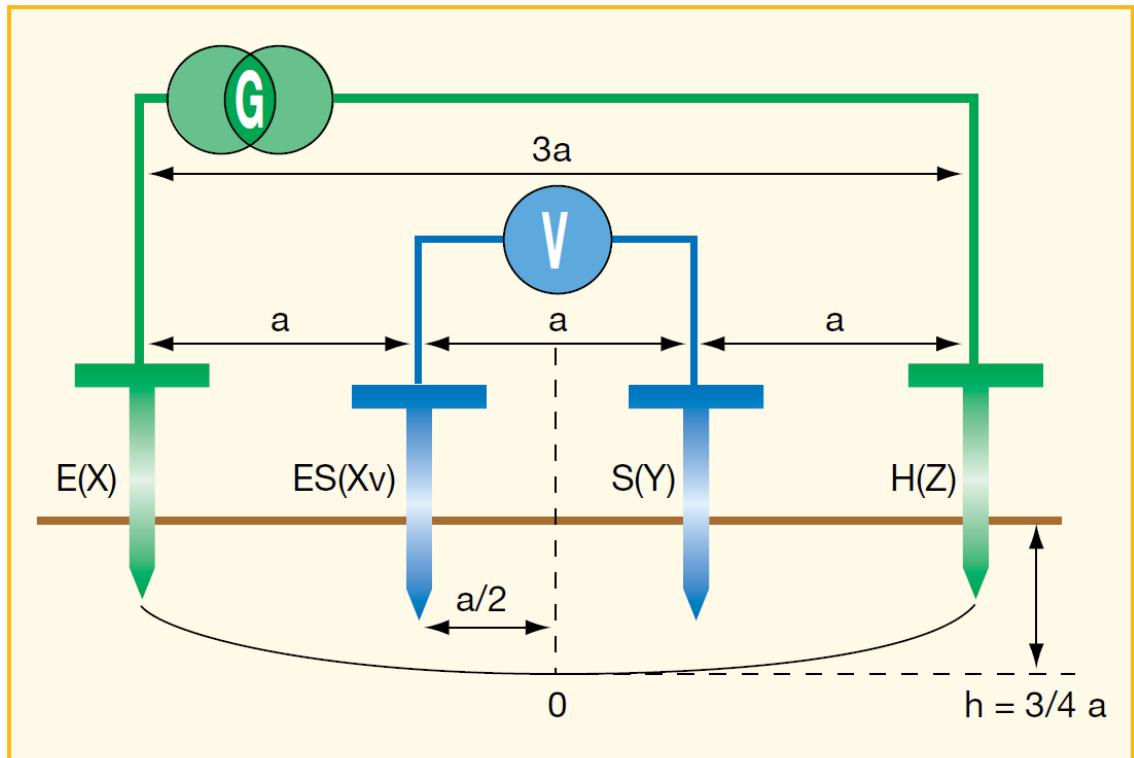
Jotta uusi maadoitusjärjestelmä tai sen uudisasennuskohta olisi tehokas ja kestäisi pahimpia mahdollisia olosuhteita, maaperän resistiivisyyden määrittäminen on toisinaan tarpeen maadoituksen suunnittelun tueksi (Monni 2015, 141; Fluke 2017, 6). Mittaustuloksista voidaan selvittää tarvittavaa maadoitusjärjestelmän laajuutta sekä sopivaa maadoituselektrodin mallia ja sen upotuskohtaa. Lisäksi mittaustulosten perusteella voidaan optimoida syntyviä kustannuksia maadoitusjärjestelmän suunnittelussa. (Chauvin Arnoux 2018, 4.)

Maaperän resistiivisyyttä voidaan mitata monilla maadoitusvastusmittareilla, joilla on vastaava ominaisuus. Yleensä resistiivisyyttä mitataan käyttämällä neljää apuelektrodia ja kahta eri mittausmenetelmää.

6.2.1 Wenner-menetelmä

Wenner-menetelmä on tunnetuin ja laajin käytetty maaperän resistiivisyyden mittausmenetelmä, jossa mittauksessa käytetään vain yhtä syvyyttä (Chauvin Arnoux 2018, 4). Kuviossa 17 on esitetty Wenner-menetelmän mittauskytkentä.

Neljä apuelektrodia upotetaan maahan suoralla linjalla, tasasin välein a ja syvyyteen h . 4 -johdin maadoitusvastusmittarin sisäinen mittalaite G syöttää mittausvirran kahden uloimman elektrodin E ja H välille. Maadoitusvastusmittarin sisäinen jännitemittari V mittaa jännite-eroa sisäelektrodien S ja ES väliltä. (Chauvin Arnoux 2018, 4.)



Apuelektrodien nimitykset E , ES , S ja H (suluissa vanhat X , X_v , Y ja Z).

Kuvio 17. Wenner-menetelmän mittauskytkentä (Chauvin Arnoux 2018, 4).

Mittalaite näyttää menetelmän mittaustulokset maadoitusarvona R . Maaperän resistiivisyyttä p lasketaan mittaustuloksista kaavan 6 avulla.

$$p = 2 \times \pi \times a \times R \quad (6)$$

missä

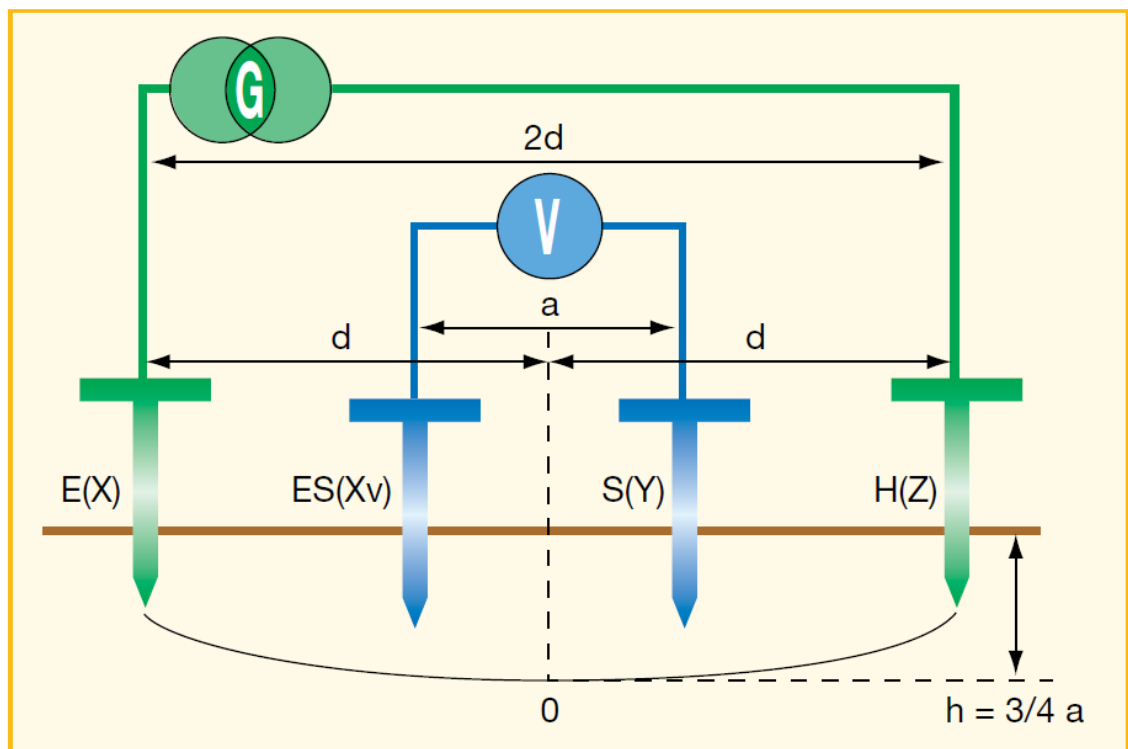
p on maaperän vastus 0-pisteessä, syvyydessä $h = 3a/4$ kuviosta 17 [Ω/m]

a on mittaussmatka [m]

R on testeristä saatu vastusarvo [Ω] (Chauvin Arnoux 2018, 4).

6.2.2 Schlumberg-menetelmä

Schlumberg-menetelmä on maaperän resistiivisyyden mittausmenetelmä, jossa mittauksessa käytetään useampia syvyyksiä. Schlumberg-menetelmän mittauskytkentä (Kuvio 18) on melkein sama kuten edellisellä menetelmällä. Ainoa ero liittyy apuelektrodien sijoitteluun, jossa kahden uloimman ja sisemmän elektrodien välimatkat $2d$ ja a eroavat toisistaan. (Chauvin Arnoux 2018, 5.)



Kuvio 18. Schlumberg-menetelmän mittauskytkentä (Chauvin Arnoux 2018, 5).

Mittalaite näyttää menetelmän mittaustulokset maadoitusarvona. Maaperän resistiivisyyttä lasketaan mittaustuloksista kaavan 7 avulla.

$$p = \frac{(\pi \times (d^2 - \frac{a^2}{4}) \times R)}{4} \quad (7)$$

missä

d on 0-pisteen ja uloimman elektrodin välinen mittausmatka [m] (Chauvin Arnoux 2018, 5).

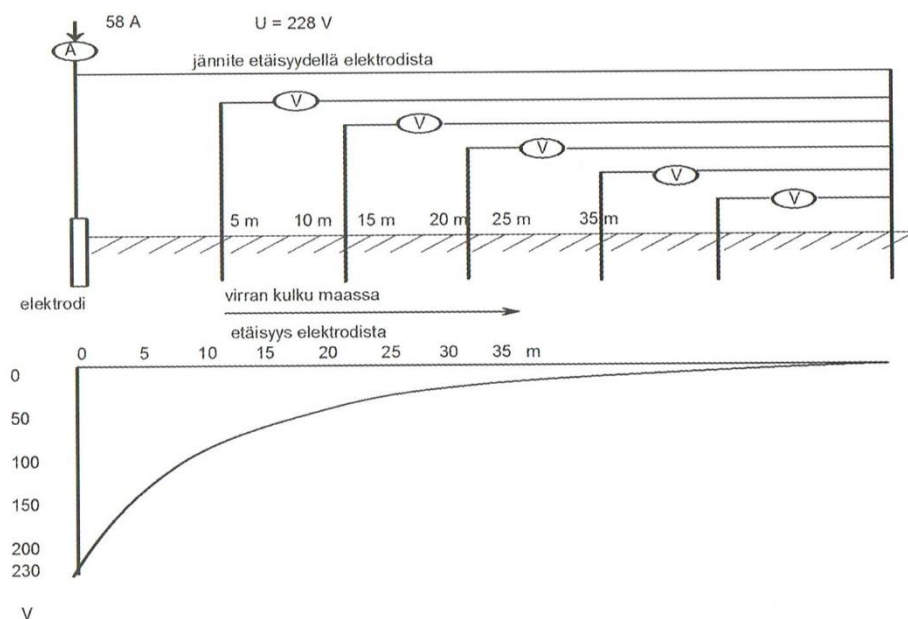
Schlumberg-menetelmän käyttö säästää aikaa tilanteissa, joissa ainoastaan kahta ulointa elektrodia tarvitsee siirtää. Menetelmää on hyvää käyttää esimerkiksi maan geologisen profiilin määrittämisessä, kun kyseessä on useita resistiivisyydsmittauksia. (Chauvin Arnoux 2018, 5.)

6.3 Maadoitusvastusarvon mittaus

Maadoitusvastusarvo mitataan erilaisilla menetelmillä ja mittaustulokset on dokumentoiva esimerkiksi maadoituskorttiin (Liite 2). Yleensä mittauksessa käytetään maadoitusmittaria, joka syöttää vakiovirtaa mitattavaan maadoituselektrodiin kautta ja samanaikaisesti mittaa maadoituselektrodiin yli vaikuttavan jännitteen. Maadoitusmittari laskee maadoitusarvon automaattisesti Ohmin lain mukaan:

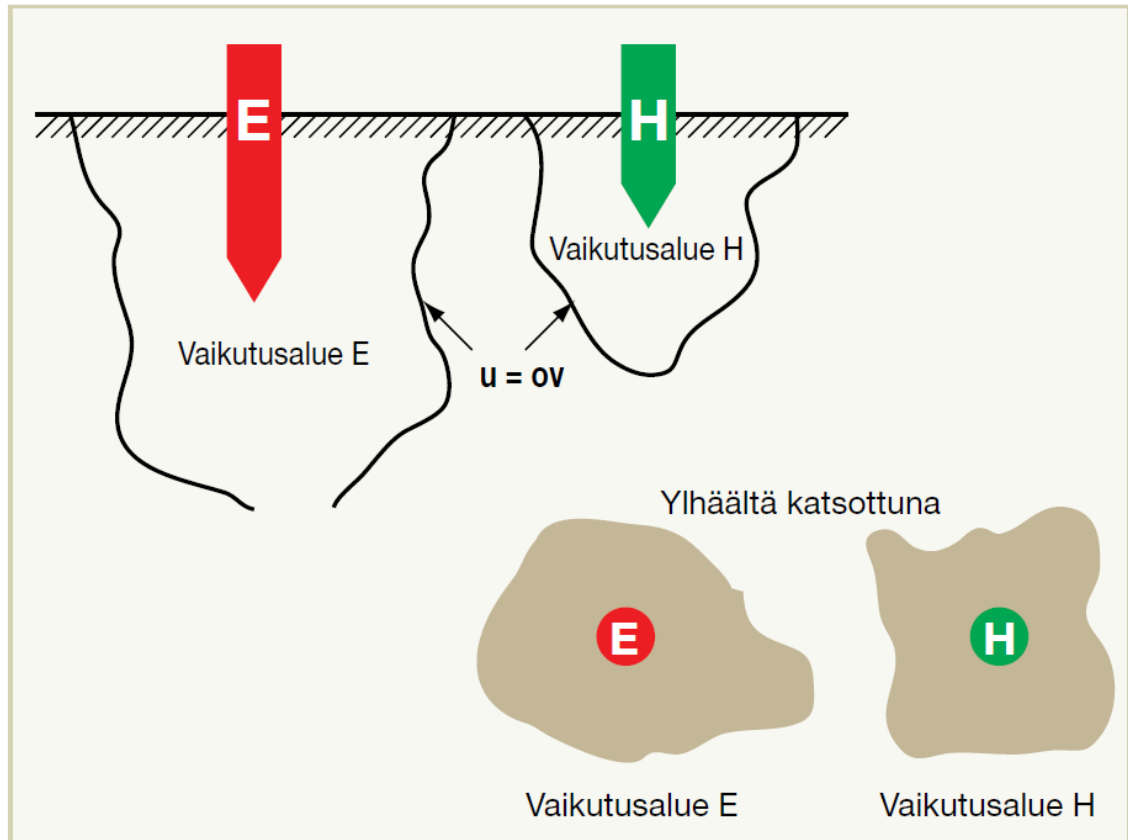
$$R = \frac{U}{I} \quad (8)$$

Virran jakautumisessa maassa maadoituselektrodista poispäin, virran tiheys sekä maadoituselektrodiin jännite-ero ovat suurimmat välittömästi elektrodin läheisyydessä (Kauppila ym. 2019, 147). Kuviossa 19 on esitetty jännitteen jakautuminen maaperässä.



Kuvio 19. Esimerkki jännitteen jakautumisesta maadoituselektrodin läheisyydessä (Kauppila ym. 2019, 148).

Kuvion 19 jännitteen jakautuminen tarkoittaa, että jokaisen maadoituselektrodin ympärillä on vaikutusalue (Kuvio 20), jonka muotoa ja kokoa ei tunneta. Mittauksessa potentiaalelektrodi kannattaa asentaa muiden elektrodien vaikutusalueiden ulkopuolelle, jotta mittaustulos olisi maksimissaan tarkka. Koska virran määrä riippuu maaperän johtavuudesta, voi elektrodien keskinäisen vaikutusalueen välttäminen olla vaikeaa. Silloin on suositeltavaa siirtää elektrodeja ja toistaa mittauksia. (Chauvin Arnoux 2018, 5 – 6.)



Kuvio 20. Elektrodien vaikutusalueet (Chauvin Arnoux 2018, 6).

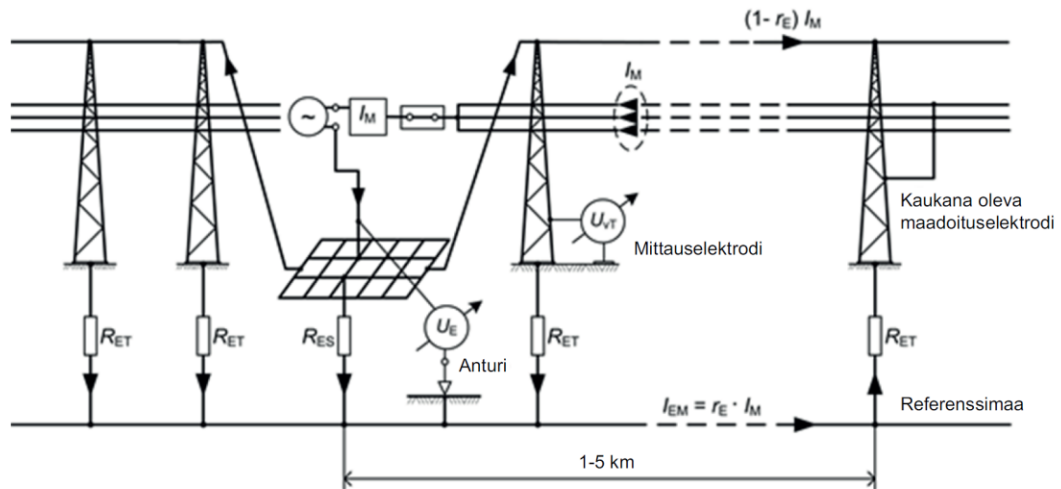
Maadoitusvastusarvo voidaan mitata myös ilman apuelektrodeja. Näissä tapauksissa maadoitusvastusarvo mitataan kahdella johtimilla tai pihtimittareiden avulla.

6.3.1 Suurtaajuusmenetelmä

Suurtaajuusmenetelmässä käytetään suurtaajuista maadoitusmittaria, jonka avulla voidaan mitata yksittäisen pylvään maadoitusresistanssin ilman ukkosjohtimen eristämistä. Mittausvirran taajuuden on oltava hyvin suuri, jotta ukkosjohtimien ja naapuripylväiden muodostama sarjaimpedanssi ei huomattavasti vaikuta mitattavan ilmajohtopylvään maadoitusvastusarvoon (SFS 6001:2018, 127).

6.3.2 Voltti-ampeerimenetelmä

Voltti-ampeerimenetelmässä mittausvirta I_M syötetään maadoitusjärjestelmään kytkemällä likimain järjestelmätasajuinen vaihtojännite maadoitusjärjestelmän ja kaukana sijaitsevan (1 – 5 km, kun kyseessä on laajalle ulottuva maadoitusjärjestelmä) maadoituselektrodin välille. Tällä tavalla maadoitusjärjestelmään syntyy jännite, joka on mitattava. (SFS 6001:2018, 127.) Kuviossa 21 on esitetty esimerkki voltti-ampeerimenetelmän mittausperiaatteesta. Maadoitusjärjestelmään yhdistettyjä ukkosjohtimia eikä maadoituselektrodien lailla toimivia kaapelivaippoja irroteta mittauksen aikana. Jos vaipan ympärillä on eristävä päällyys, vaipan maadoitukset voidaan irrottaa.



I_M Testivirta (yleensä mitataan vain jännitteen ja virran itseisarvo)

I_{EM} Mittauksen aikainen maavirta (tässä tapauksessa ei suoraan mitattavissa)

r_E Kaukaiseen maadoituselektrodiin yhdistetyn johdon reduktiokerroin

R_{ES} Maadoitusruudukon maadoitusresistanssi

R_{ET} Pylvään maadoitusresistanssi

U_E Mittauksen aikainen maadoitusjännite

U_{VT} Mittauksen aikainen prospektiivinen kosketusjännite

Kuvio 21. Esimerkki maadoitusimpedanssin mittaamisesta voltti-ampeerimittarimenetelmällä (SFS 6001:2018, 131).

Maadoitusimpedanssiarvo lasketaan yhtälöstä:

$$Z_E = \frac{U_{EM}}{I_M \times r} \quad (9)$$

missä

U_{EM}	on	maadoitusjärjestelmän ja referenssimaassa (kaukainen maa) olevan maapiikin välinen jännite [V]
I_M	on	mittausvirta [A]
r	on	johdon reduktiokerroin referenssimaahan nähden (SFS 6001:2018, 128).

6.3.3 Maasulkumittausmenetelmä

Maasulkumittausmenetelmässä mitataan maasulkuvirta ja maadoituselektrodin yli vaikuttava maadoitusjännite. Mittaus on mahdollistaa suorittaa vain tietyssä verkossa, jossa on laukaiseva maasulkusuojaus. (Tolonen 2013, 44.) Maadoitusvastusarvo lasketaan Ohmin lain mukaan kaavalla 8.

Mittauksessa jänniteapuelektrodi viedään riittävän kauaksi mitattavasta maadoituselektrodista. Mittaus on suoritettava kahdella eri jänniteapuelektrodin etäisyyden arvolla. Saatu mittaustulos ei saa muuttua. Koska mittaus tehdään jännitteellisenä, on noudatettava jännitetöistä annettuja asetuksia. (Tolonen 2013, 44.)

6.3.4 Käännepistemenetelmä

Käännepistemenetelmässä mitataan suoraan maadoitusvastusarvoja. Mitatuista maadoitusvastusarvoista piirretään käyrä, jonka käänne- tai tietyistä pisteistä saadaan tutkittavan maadoituselektrodin tai sen järjestelmän maadoitusvastusarvo. (Kauppila ym. 2019, 148.)

Käännepistemenetelmää käyttäen maadoitusvastusarvo voidaan mitata jännitteettömille asennuksille jo ennen kohteen liittämistä sähköverkkoon. Tällöin potentiaalintasauskiskosta voidaan irrottaa turvallisesti maadoituselektrodi mitausta varten. Maadoituksen avaaminen jännitteisessä verkossa muodostaa aina vaaratilanteen, joka koskee koko muuntopiiriä ja kaikkia sen sähkökäyttäjiä. Maadoitusvastusarvo voidaan mitata käännepistemenetelmällä myös maadoituselektrodin potentiaalintasauskiskosta irrottamatta. Kuitenkin, tässä tapauksessa

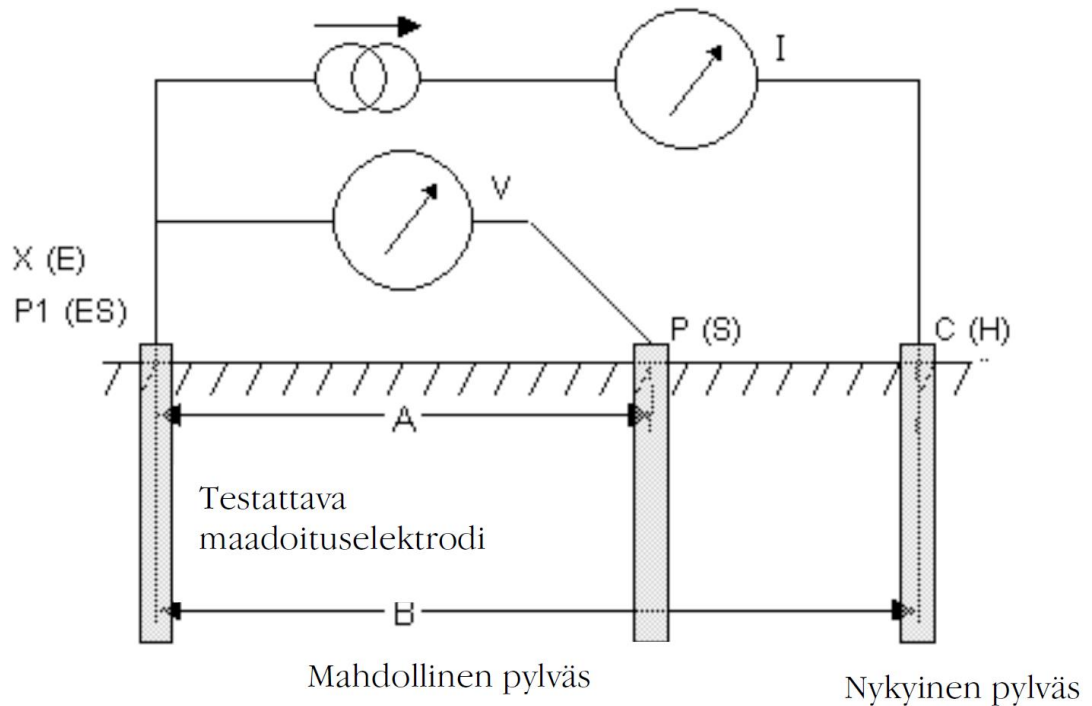
mitattu maadoitusvastusarvo voi koostua muista potentiaalintasaukseen liittyvistä lisävastuksista, kuten vesijohto- tai kaasuputkista, jotka aiheuttavat virheellisen lopputuloksen. Mittaus kannattaa tehdä yksittäiselle maadoituselektrodille tai maadoitusjärjestelmille, joilla on vähän potentiaalintasaukseen liittyvistä vastuksia. (Chauvin Arnoux 2018, 7.)

Mittaukset tehdään mittauslaitteistoilla, joissa on kolme tai neljä mittajohdintermiinaalia. Mittalaitteen syöttävä vaihtojännitteen suuruus voi olla jopa 500 V suuruisen mittalaittevalmistajasta riippuen. Syöttävä taajuus yleensä vaihtelee välillä 70 – 140 Hz. (Kauppila ym. 2019, 148.) Suositeltu käytetty vaihtojännitteen taajuus ei voi ylitä arvoa 150 Hz (SFS 6001:2018, 127).

Mittalaitteen sisäinen virtalähde syöttää mittausvirran tutkittavaan elektrodiin. Elektrodista virta kulkee maan kautta virta-apuelektrodiin ja sieltä palauttaa virtalähteeseen. Seurauksena mitattavan elektrodin ja apujännite-elektrodin välille muodostuu potentiaaliero. Mittari laskee maadoitusvastusarvo automaattisesti Ohmin lain mukaan kaavalla 8.

Mittajohtimien pituudet ovat yleensä 200 m ja 40 m. 200 m:n pituisia mittajohtimia käytetään esimerkiksi muuntopiirien maadoitusvastusarvon mittauksessa, koska SFS 6001 -standardin mukaan käännepistemennetelmässä mittaussuoran on oltava vähintään 4 kertaa suurempi kuin mitattavan elektrodin pituus, joka on yleensä 50 m, vaakaelektrodia käytettäessä. Joissakin tapauksissa, kuten muuntamon läheisyydessä, käytetään vielä pidempiä mittajohtimia. Toisaalta, jos maadoitus on tehty useimmissa lähekkäin olevilla pystymaadoituselektrodeilla hyvin johtavassa maaperässä, mittaus voidaan suorittaa 40 m:n pituisilla mittajohtimilla. (Monni 2015, 136, 140.)

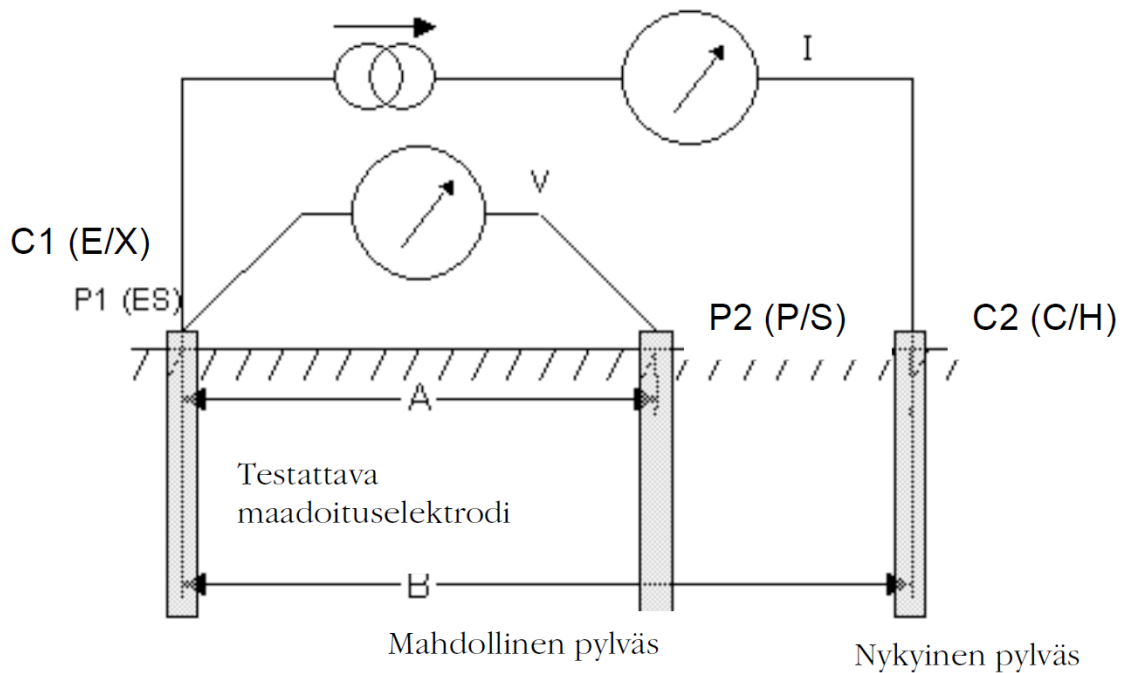
Kuviossa 24 on esitetty esimerkki maadoitusvastusmittauksen mittauskytkennästä ja -periaatteesta. Tutkittava maadoituselektrodi kytketään maadoituslaitteen yhdistysjohdolla α (Monni 2015, 137). Jos mittalaitteella on vain kolme mittajohtimien terminaalia, laitteen mittajohtimet kytketään kolmeen terminaaleihin kuvion 22 mukaan, jossa X-terminaali kytketään tutkittavaan elektrodiin (Heard 2012, 27).



Kuvio 22. Kaavio kolmiterminaaliseen vastusmittaukseen ilman nollausta (Heard 2012, 27).

Kuviossa 23 $C1$ ja $P1$ -terminaalit on kytketty toisiinsa tutkittavalla maadoituselektrodilla. Tämä on "kolme terminaaliala nollatilanteesta" -asetelma, joka on sovellettavissa neljän terminaalin mittareilla. Tämä asetelma antaa $P1$:n vastuksen nollautua suhteessa tutkittavaan elektrodiin. Kolmiterminaalimittareilla tai kun nollautua ei vaadita, vain $P1$ -terminaali (tai X -terminaali kolmiterminaalisisissa väli-neissä) kytketään tutkittavaan elektrodiin (Kuvio 22). (Heard 2012, 26 – 27.) Terminaalien tunnuksat vaihtelevat mittalaitteen valmistajilta riippuen.

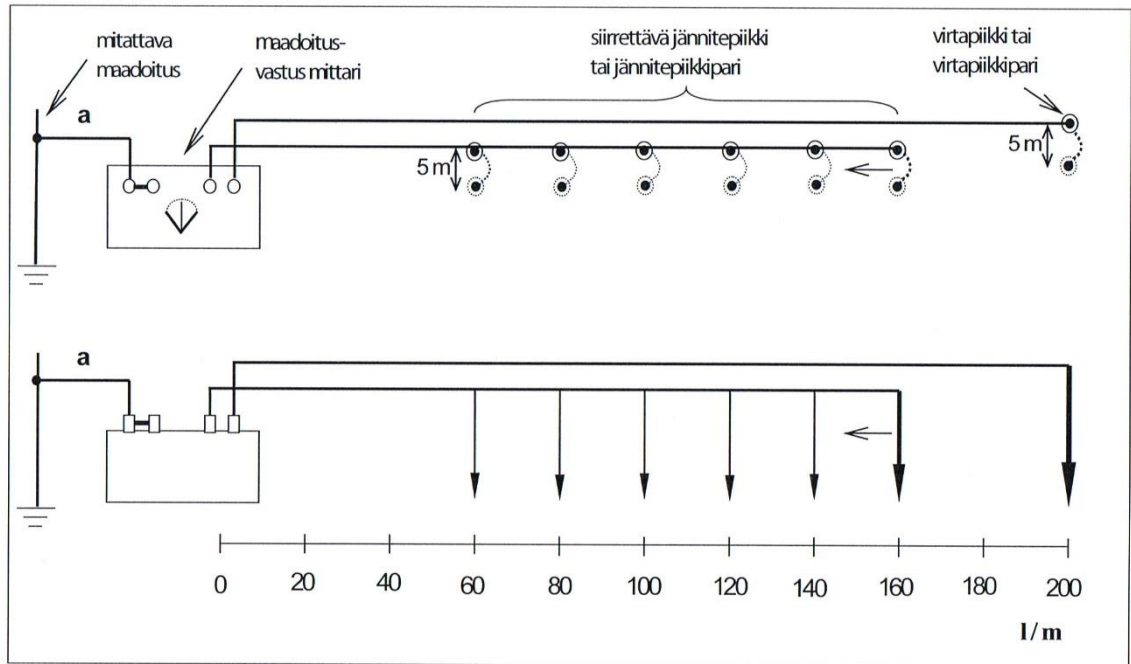
Mittajohtimen nollaus eliminoi sisäisen vastuksen vaikutuksen mittaustuloksiin ja antaa noin 10 kertaa paremman erotellutarkkuuden kuin kolmen terminaalien kytkentä. Neljä terminaalien kytkentä helpottaa mitata hyvin alhaisia maadoitusvastusvastusarvoja esimerkiksi sähköjatelussa ja -tuotanto sovelluksissa, joissa nämä arvot ovat vain muutamien Ohmien luokkaa. (Chauvin Arnoux 2018, 7.)



Kuvio 23. Luonnos kolmiterminaliselle vastuksen mittaukselle nollalähtökohdasta (Heard 2012, 26).

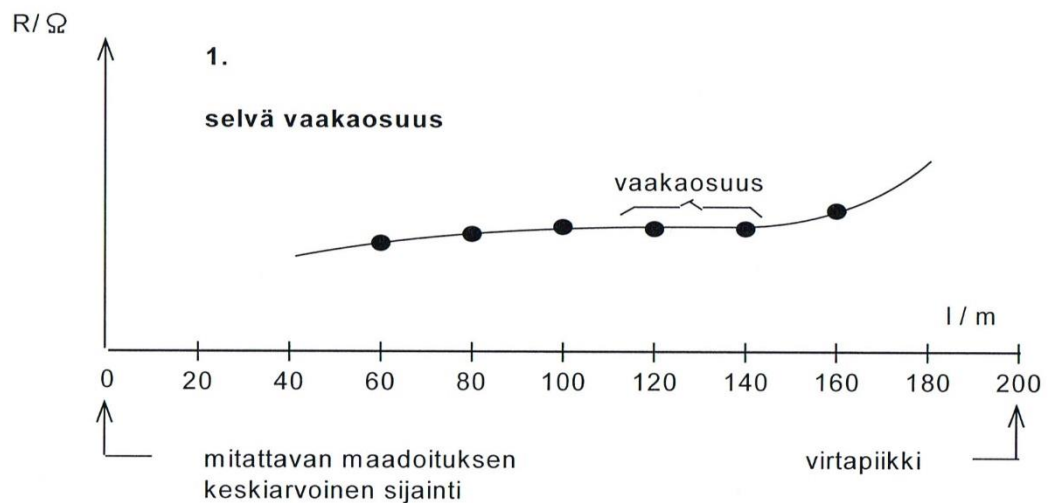
Virtamittausjohdin kytketään maadoitusmittariin ja levitetään mitaussuoralle 200 m:n pituudeltaan ja kytketään maahan huolellisesti painettuun apuvirtaelektrodiin tai apuvirtaelektrodipariin. Apujännite-elektrodin etäisyyden mitattavasta maadoituselektrodista on oltava vähintään 2,5 kertaa elektrodin enimmäislaajuus (mittaussuunnassa), kuitenkin vähintään 20 m (SFS 6001:2018, 127). Jännitteenmittausjohdin kytketään mittalaitteen ja levitetään mitaussuoralle esimerkiksi 160 m pitkiin ja kytketään apujännite-elektrodiin tai apujännite-elektrodipariin. Mittausjohtimet asennetaan vähintään 0,5 m:n päähän toisistaan. Jännitteenmittausjohtimeen voidaan tehdä tasavälein pituusmerkintöjä esimerkiksi 20 m:n välein tai käyttää mittarullaa. (Monni 2015, 137; Kauppila ym. 2019, 148.)

Ensimmäinen mittaus tehdään, kun apujännite-elektrodi on sijoitettu 160 m:n päähän. Otetaan mittarista lukema tässä pisteessä ja aletaan siirtämään apujännite-elektrodi seuraavan pituusmerkintään apuvirtaelektrodista poispäin. Dokumentoidaan mittarin lukemat erilaisista mittauspisteistä ja muodostetaan niistä maadoitusvastuksen suhteen apujännite-elektrodin etäisyyttä kuvaava käyrä, josta maadoitusvastusarvo voidaan määrittää. (Monni 2015, 137.)



Kuvio 24. Maadoitusvastusmittauksen mittauskytkentä (Monni 2015, 137).

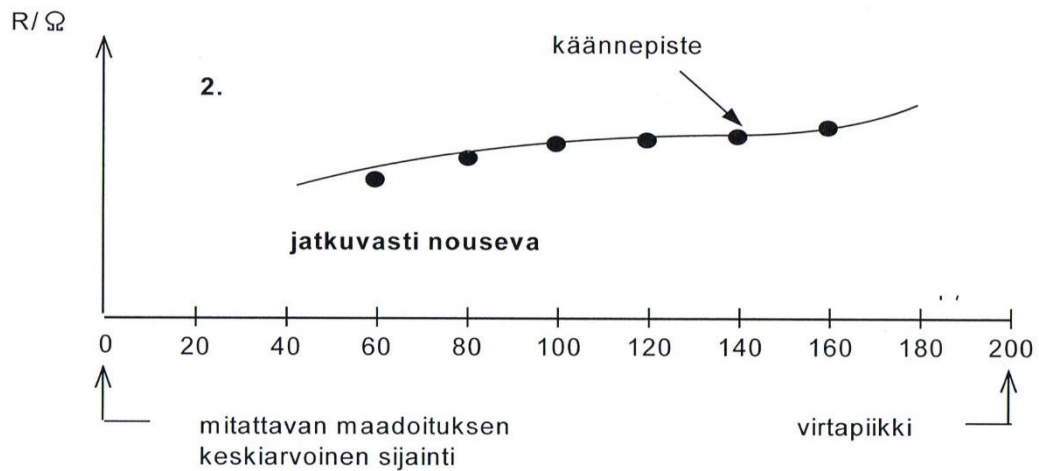
Maadoitusvastuskäyrän mittauspisteet valitaan käännepisteen läheisyydessä tiheämmin. Maadoitusvastusarvo saadaan käyrän selvältä vaakaosuudelta (Kuvio 25). (Kauppila ym. 2019, 150.)



Kuvio 25. Maadoitusvastusarvon määrittäminen käyrän vaakaosuudelta (Monni 2015, 139).

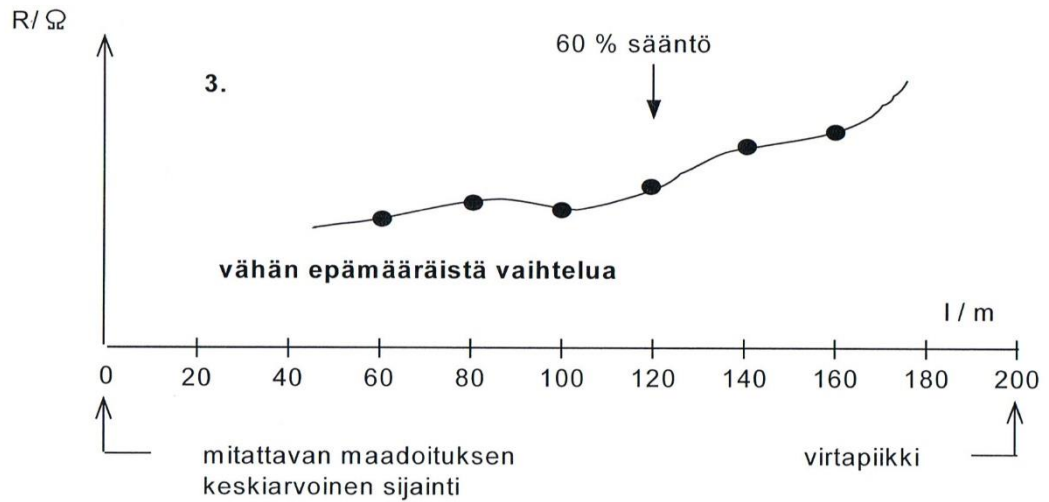
Jos käyrältä puuttuu vaakasuoraa osaa, mutta käännepiste on hyvin selvästi näkyvissä, voidaan maadoitusvastusarvo ottaa tästä kohdasta (Kuvio 26). Tässä

tapauksessa tulos on yleensä jonkin verran todellista arvoa suurempi. (Kauppila ym. 2019, 150.)



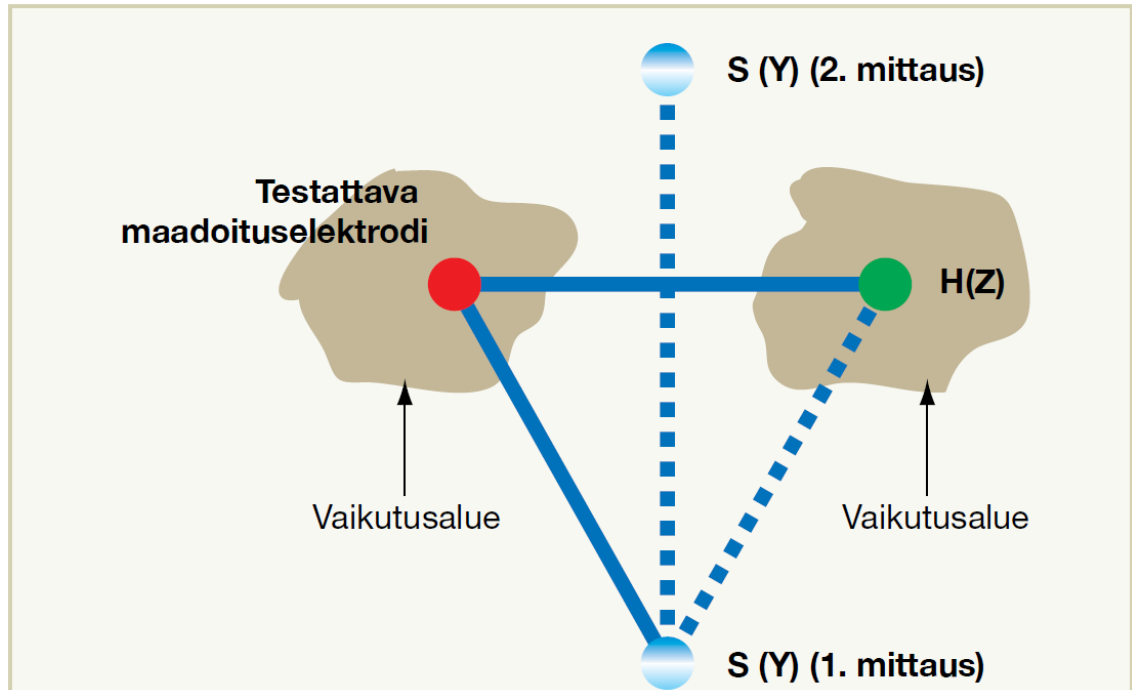
Kuvio 26. Maadoitusvastusarvon määrittäminen käyrän käännepisteestä (Monni 2015, 139).

Maadoitusvastusarvo voidaan myös määrittää mittauspisteestä, jossa apujännite-elektrodin etäisyys on 60 % apuvirtaelektrodin etäisyydestä. Teoreettisesti, tässä pisteessä apujännite-elektrodi sijaitsee muiden elektrodien vaikutusalueiden ulkopuolella. Tällaista käännepistemenetelmän mittausperiaatetta kutsutaan 60 % säännöksi (Kauppila ym. 2019, 150). Joissakin maadoitusmittarien käyttöohjeissa esimerkiksi Chauvin Arnoux, Megger käytetään 62 % sääntöä, jossa apujännite-elektrodin etäisyys on 62 % apuvirtaelektrodin etäisyydestä (Heard 2012, 26; Chauvin Arnoux 2018, 6). 60 % tai 62 % -sääntöjä yleensä käytetään, jos elektrodi sijaitsee riittävän homogeenisessa maaperässä. Jos maaperä ei ole riittävä tasa-aineinen, 60 % tai 62 % -säännöillä mitattu maadoitusvastusarvo voi olla epätarkka (Kuvio 27). Lisäksi joskus on vaikea tarkasti määritellä missä mitattavat elektrodit maassa sijaitsevat, siksi edelliset sääntöjä käytetään mittaus tuloksien määrittelyssä vain poikkeustapauksissa (Monni 2015, 138).



Kuvio 27. Maan sähkönjohtavuus vaihtelee aiheuttaen käyrämuotoon poikkeamia (Monni 2015, 139).

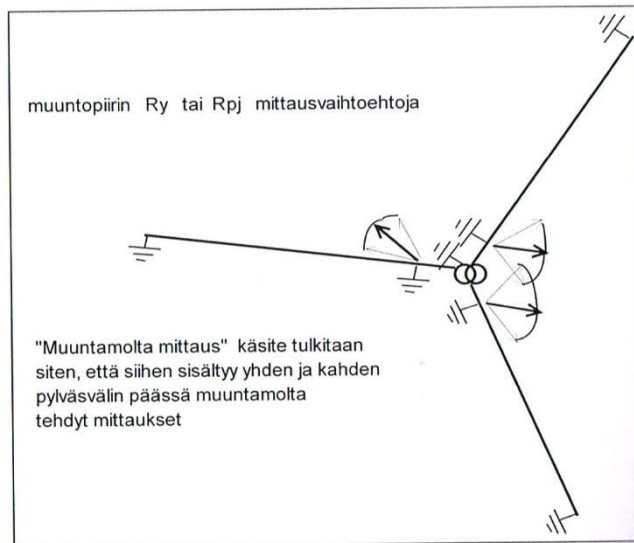
Joskus apujännite-elektrodi ei ole mahdollista sijoittaa maahan 60 – 62 % alueelle. Tässä tapauksessa elektrodit voidaan sijoittaa kuvion 28 mukaan. Apuelektrodit S ja H on asetettava siten, että maadoituselektrodi E ja apuelektrodit S ja H muodostavat yhdessä tasasivuisen kolmion. Ensimmäinen mittaus on suoritettava S :n sijainnin yhdellä puolella ja toinen mittaus S :n sijainnin toisella puolella. Mittaustulokset eivät saa poiketa enemmän kuin muutamaa prosenttia toisistaan, muuten apujännite-elektrodi S sijaitsee vaikutusalueella. Apujännite-elektrodiä kannattaa tällöin siirtää ja mittaus uusia. Kuitenkin, vaikka mittaustulokset ovat samanarvoisia molemmilla puolella, nämä tulokset voivat olla epäluotettavia, vaikutusalueen laajuuden takia. Parhaat mittaustulokset saavutetaan toistamalla mittaus mittaussväliä pidentämällä. (Chauvin Arnoux 2018, 6 – 7.)



Kuvio 28. Tasasivuinen kolmiokytkentä (Chauvin Arnoux 2018, 7).

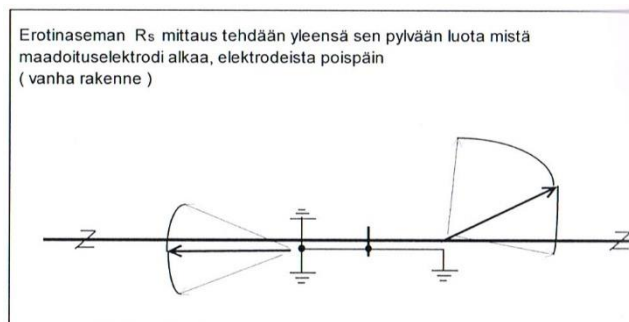
Jännite- ja virta-apuelektrodit kannattaa sijoittaa mitattavan maadoituksen vaikutusalueen ulkopuolelle, eikä vaikutusalueella saa olla muita metallisia vesijohtoja tai muita sellaisia. Mitattavan maadoituksen koostuessa muutamista eri osaelektrodista mittauskohda on valittava mahdollisimman keskeltä järjestelmää. (Kaupila ym. 2019, 149.) Maan ominaisresistanssin vaihtelun vaikutusta mittatuloksiin voidaan pienentää kahta apujännite- ja apuvirtaelektrodia käyttämällä (Monni 2015, 140).

Keskijännite- ja pienjännitemaadoitusverkon ollessa yhdistettynä muuntamolla mittaussuoran on oltava mahdollisimman kaukana lähimmistä maadoituselektrodeista, jolloin mittaussuora valitaan lähimmäistä elektrodista poispäin. Lisäksi pienjänniteverkkokarttaan on piirrettävä nuoli, jolla osoitetaan mittaussuunnat. (Monni 2015, 136.) Kuviossa 29 on esitetty esimerkki muuntamon maadoitusvasituksen mittauspaikeista ja -suunnista.



Kuvio 29. Muuntopiirin maadoitusvastuksen mittauspaikkoja (Monni 2015, 136).

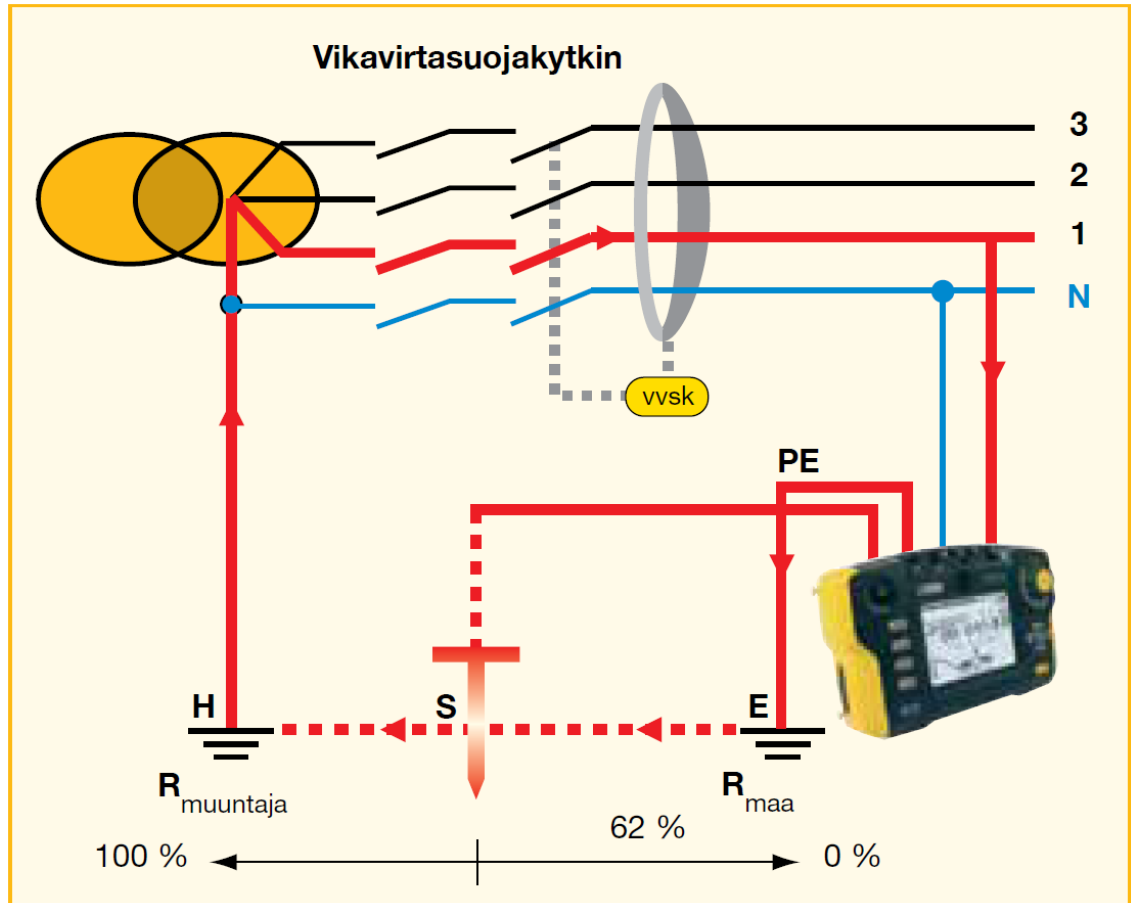
Eroinaseman suojamaadoituksen maadoitusmittaus suoritetaan yleensä sen pylvään luota, mistä maadoituselektrodi alkaa (Kuvio 30). Mittaus suoritetaan elektrodeista poispäin. Turvallisuuden takia mittausta ei saa tehdä ukonilman aikana.



Kuvio 30. Vanhan rakenteen erotinaseman maadoitusvastuksen mittauspaikkoja (Monni 2015, 136).

6.3.5 Mittaus yhdellä apuelektrodilla

Tämä mittausmenetelmä sopii vain TT - tai IT -järjestelmille ja eikä se vaadi maadoituselektrodin irrottamista maadoituskiskosta. Mittauskytkentä koostuu yhdestä maadoitussauvasta S , apuelektrodista H , joka toimii jakelumuuntajan maadoitusjärjestelmänä ja apuelektrodista E , jonka PE-johdin toimii ylimääräisenä suojamaana (Kuvio 31). (Chauvin Arnoux 2018, 7.)



Kuvio 31. Yhdellä apuelektrodilla mittausmenetelmän mittauskytkentä (Chauvin Arnoux 2018, 7).

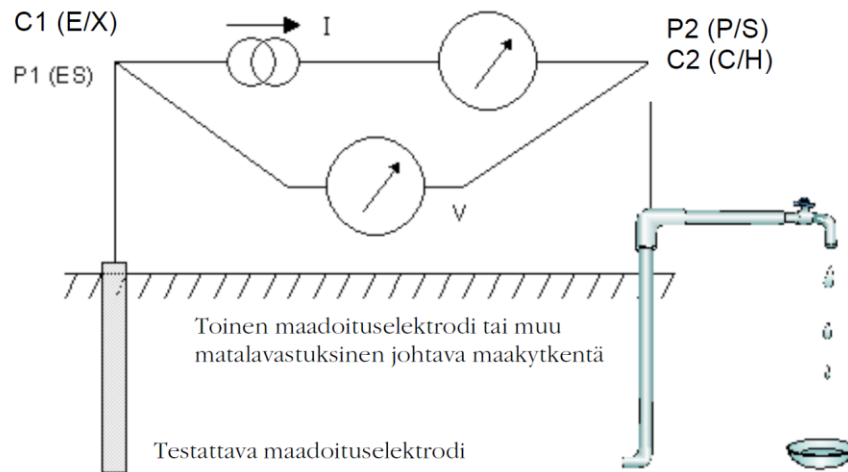
Maadoitusvastusarvo mitataan 60 % tai 62 % sääntöjä käyttämällä. Apuelektrodi *S* on sijoittava elektrodien vaikutusalueiden ulkopuolelle. Mittausjännite saadaan suoraan verkkojännitteestä mittalaitteen pistokkeen kautta. Menetelmä sopii yksittäisen maadoituksen mittaamiseen.

6.3.6 Vaihe-Pe silmukkamittaus

Vaihe-Pe silmukkamittaus sopii vain TT -järjestelmille. Silmukkamittausta yleensä käytetään kohteissa, joissa apuelektrodien sijoitus maaperään on mahdotonta, esimerkiksi kaupunkiverkostoissa, joissa on paljon betonirakennelmia. (Chauvin Arnoux 2018, 7.) Mittauskytkentä on sama kuin edellisessä menetelmässä (Kuvio 32). Ainoa ero on, että mittauksessa ei käytetä apuelektrodia.

täviä kytkentöjä tai jalkoja. Mittalaite syöttää vaihtovirran tutkittavaan järjestelmään ja mittaa siinä kehittyvän jännitteen kuvion 33 mukaan. Maadoitusvastusarvo mitataan automaattisesti Ohmin lailla kaavalla 8. Mittatulos on luotettavampi, jos mittarin syöttövirta on kohtalaisen korkea. (Heard 2012, 25; Fluke 2017, 11.)

Kuva 3: kaaviokuva kahden terminaalin vastusmittauksesta



DET instrumentit automaattisesti yhdistävät **C1-P1** ja **C2-P2** terminaalit kun kahden terminaalin testi valitaan.

Kuvio 33. Kaaviokuva kahden terminaalin vastusmittauksesta (Heard 2012, 25).

6.3.8 Yksittäisiin resistansseihin perustuva menetelmä

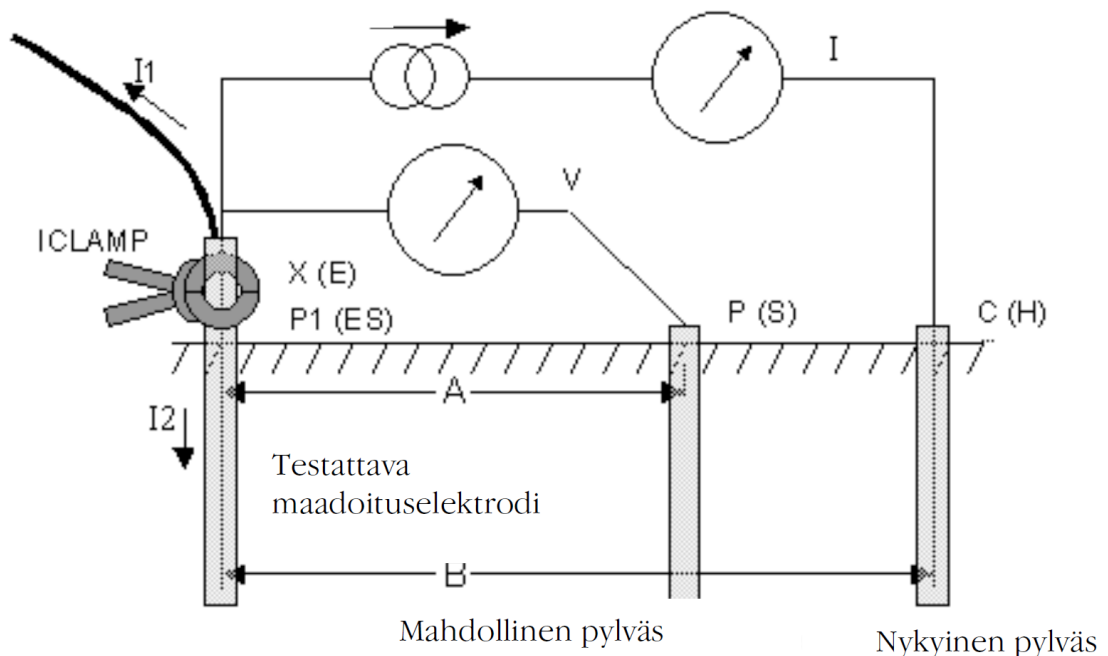
Yksittäisiin resistansseihin perustuva menetelmä voidaan käyttää, jos maadoitusjärjestelmä koostuu erillisistä maadoituselektrodeista, joilla käytännössä ei ole vaikutusta toisiinsa, mutta jotka ovat yhdistysjohtimilla toisiinsa liitetyt (SFS 6001:2018, 128). Järjestelmän maadoitusimpedanssi saadaan mittaamalla ja laskemalla.

Kunkin maadoituselektrodi irrotetaan yhdistysjohtimista ja mitataan sen maadoitusresistanssi käännepistemetelmällä. Liitosjohtimien impedanssit lasketaan ja maadoitusimpedanssi saadaan maadoitusresistanssin ja liitosjohtimien impedanssien muodostamasta ekvivalenttipiiristä. (SFS 6001:2018, 128.)

6.3.9 Selektiivinen menetelmä

Suurin osa kaikista edellisistä mainitusta maadoitusvastusarvon mittaamenetelmistä yleensä käytetään vain yksittäisen maadoituksen mittaamiseen. Maadoituksen kostuessa muutamista rinnakkaismaadoittimesta jokaisen maadoitin on erotettava toisistaan yksittäisten vastusten mittaamiseksi, jotta mittatulokset olisivat luotettavia. Joissakin tapauksissa, tietyn yksittäisen maadoittimen irrottaminen muista maadoittimista on aikaa vievä tai lähes mahdotonta. Selektiivinen menetelmä säästää aikaa ja helpottaa maadoitusarvon mittausta näissä tilanteissa.

Selektiivisellä menetelmällä tutkittavaa maadoituselektrodia ei tarvitse irrottaa muista maadoituselektrodista. Mittauskytkentä on sama kuten käännepistemenetelmän kytkentä (Kuvio 34). Ainoa ero liittyy maadoituselektrodin ympärille asetettavaan erityiseen virtapihtiin, jonka tehtävänä on poistaa muiden rinnakkain vaikuttavien vastusten vaikutukset mittausaikana (Fluke 2017, 9). Lisäksi mittauskytkentään voidaan lisätä nollaus mittalaitteen terminaalien määrästä riippuen.



Kuvio 34. Kaavio kolmiterminalisen vastusmittaukseen käyttäen ARTia ilman nollausta (Heard 2012, 27).

Mittari syöttää mittausvirran I apuvirtaelektrodin ja maadoituselektrodin välille samalla, kun jännitepotentiaalin alenema V apujännite-elektrodin ja maadoituselektrodin välillä mitataan. Virtapihdit mittaavat vain tutkittavan maadoituselektrodin läpi kulkevaa virtaa I_2 . Mittarin syöttövirta kulkee myös muiden rinnakkaisten vastusten läpi (virta I_1), mutta vain virtapihdin (eli testattavan maadoituselektrodin) läpi kulkevaa virtaa I_2 mittari käyttää automaattisen maadoitusvastusarvon R mittaamiseen kaavalla 10. (Heard 2012, 27; Fluke 2017, 9.)

$$R = \frac{V}{I_2} \quad (10)$$

missä

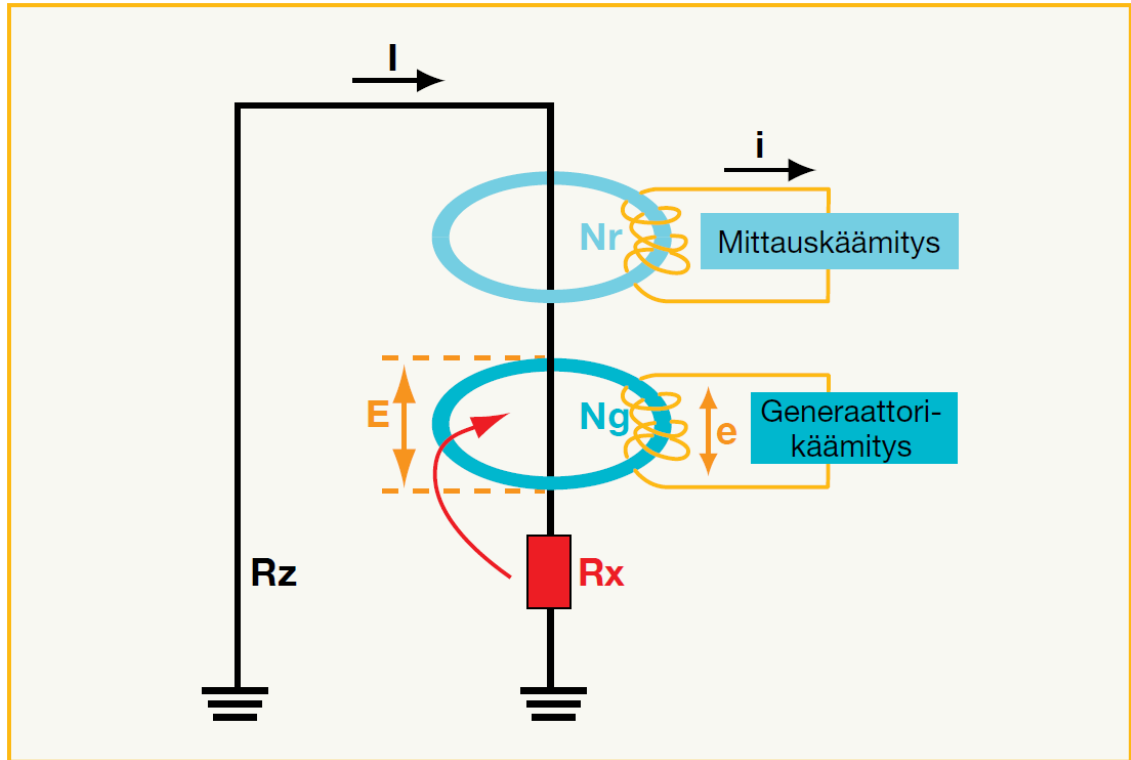
R	on	maadoitusvastusarvo [Ω]
V	on	jännitepotentiaalin alenema [V]
I_2	on	testattavan maadoituselektrodin läpi kulkeva virta [A]

(Heard 2012, 27).

6.3.10 Sauvaton menetelmä

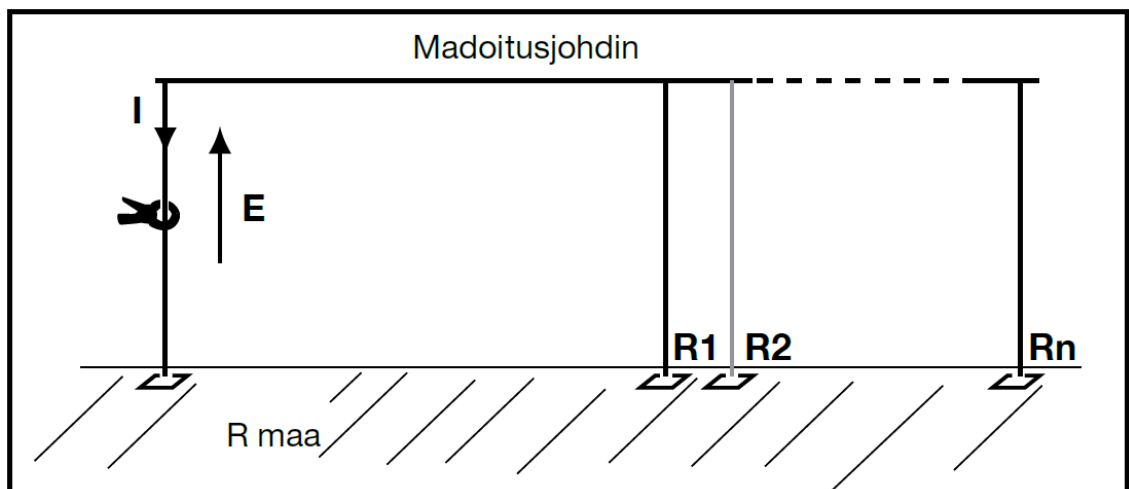
Kuten selektiivinen menetelmä, sauvaton menetelmä ei vaadi rinnakkaisen maadoittimen irrottamista ja sen lisäksi apuelektrodeja ei enää tarvitse sijoittaa. Mittaus tapahtuu yhdellä erillisellä maadoitusvastuspihdillä tai kahdella pihdeillä, jotka kytketään mittalaitteen terminaaleihin.

Sauvaton mittaus yhdellä erillisellä maadoitusvastuspihdillä tapahtuu yksinkertaisesti pihdin maadoituskaapeliin laitamalla. Maadoitusvastusmittari koostuu kahdesta käämityksestä, joista toinen toimii vaihtovirtalähteenä ja toinen virtamittarina (Kuvio 35). Pihtimittarin käämitys syöttää vakiovaihtojännitteen E mitattavaan piiriin, jolloin virta I kulkee resistiivisen silmukan läpi. Pihtimittarin ”vastaanotinkäämitys” mittaa sen virran ja laskee automaattisesti maadoituselektrodin silmukavastusarvon Ohmin lailla kaavalla 8. (Chauvin Arnoux 2018, 9.)



Kuvio 35. Maadoitusvastuspihtimittarin mittausperiaate (Chauvin Arnoux 2018, 9).

Maadoitusvastuspihti toimii sillä tavalla, että rinnakkain tai useista kohdista maadoitetuissa järjestelmissä kaikkien maadoitusreittien kokonaisvastus on huomattavasti matalampi verrattuna mihin tahansa yksittäiseen reittiin (tutkittava maadoitus) (Kuvio 36). Näin kaikkien rinnakkaisten paluureittien kokonaisvastukset ovat todellisuudessa nolla.



Kuvio 36. Sähkövirran maadoitusreitit ja -vastukset sauvattomalla menetelmällä (Chauvin Arnoux 2018, 9).

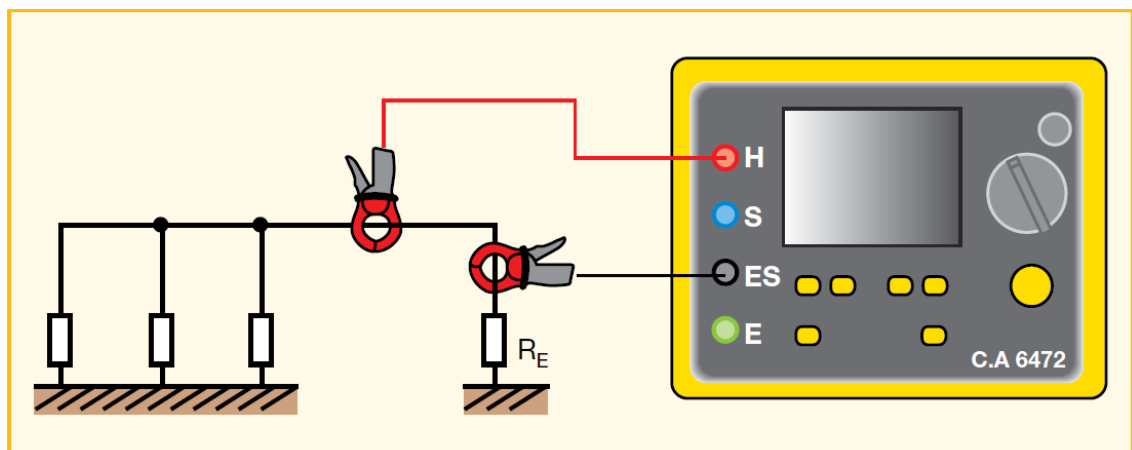
Jännitteen E syötäessä jossakin pisteessä maadoitusjärjestelmässä R_x , piirissä kulkeva virta I määrittää maadoitusarvon seuraavan kaavan mukaisesti:

$$R_{loop} = \frac{E}{I} = R_x + R_{maa} + (R_1 // R_2 // R_3 ... // R_n) + R_{kaapeli} \quad (11)$$

missä

R_{loop}	on	mittarilla mitattu maadoitusvastusarvo [Ω]
E	on	mittarin annettu vakiovaihtojännite [V]
R_x	on	haettu mittaussarvo [Ω]
R_{maa}	on	mittauspiirin maavastus (jonka arvo on yleensä $< 1 \Omega$)
$R_1 // R_2 ... // R_n$	on	useiden maadoitusten rinnakkaisvastus (todellisuudessa on nolla)
$R_{kaapeli}$	on	mittauspiirin kaapelien vastus (jonka arvo on yleensä $< 1 \Omega$) (Chauvin Arnoux 2018, 9).

Sauvaton silmukkamittaus voidaan suorittaa myös kahdella pihdillä. Mittausperiaate on sama kuin maadoitusvastusvirtapihtimenetelmän käyttämällä. Kaksi mittalaitteen kytkettyä virtapihtiä kytketään tutkittavaan maadoitusjohtimeen (Kuvio 37).



Kuvio 37. Silmukkamittaus kahdella pihdillä (Chauvin Arnoux 2018, 9).

Toinen pihti toimii generaattorina ja toinen virtamittarina. Tällaisen mittausperiaatteen hyvä puoli on se, että mittaus voidaan helposti suorittaa hankalille kohteille, joihin isokokoinen maadoitusvastuspihtimittari ei sovellu. (Chauvin Arnoux 2018, 9.)

Sauvaton menetelmä sopii ainoistaan maadoitusjärjestelmille, joissa tutkittava maadoitin sijaitsee rinnakkain matalaimpedanssisten maadoituspiirien kanssa. Menetelmän käyttö ei sovellu tilanteissa, joissa tutkittavalle maadoitukselle ei ole olemassa matalaimpedanssista rinnakkaista piiriä, kuten yhden maadoituselektrodin kohteissa. Mitattu maadoitusvastusarvo voi poiketa todellisesta maadoitusvastusarvosta, jos rinnakkain olevien matalaimpedanssisten maadoituspiirien määrä on hyvin pieni tai rinnakkaiselektrodeilla on vaikutusta mitattuun arvoon nähden. (Chauvin Arnoux 2018, 9 – 10.)

7 MAADOITUSVASTUSARVON MITTAUSMENETELMIEN VERTAILU JA VALINTA

Parhaat mittaustulokset saadaan sellaisella menetelmällä, joka vastaa parhaiten todellista maasulkutilannetta, esimerkiksi voltti-ampeerimenetelmällä. Voltti-ampeerimenetelmän huono puoli on se, että menetelmä vaatii erikoiskaluston, pitkät mittauss johdot ja usein käyttökeskeytyksiä keskijänniteverkossa. Menetelmää käytetään yleensä vain silloin, kun erittäin pienen maadoitusvastusarvon tarkka mittaaminen on välttämätöntä. Menetelmää käytetään yleensä kantaverkon maadoitusimpedanssimittaukseen. (Kauppila ym. 2019, 151 – 152.)

Käännepistemenetelmä on usein käytetty maadoitusvastusarvon mittausmenetelmä, joka ei vaati mitään erikoiskytkentöjä tai käyttökeskeytyksiä. Lisäksi sen käyttö on helpompi voltti-ampeerimenetelmään verrattuna. Menetelmän huono puoli on se, ettei kaikkia virhetekijöitä aina pystytä poistamaan ilman maadoitusvastusarvon poikkeamista todellisesta arvosta. Lisäksi, kuten voltti-ampeerimenetelmä, käännepistemenetelmä vaatii pitkäjohtimien käyttöä mittausaikana. Menetelmää käytetään yleensä jakelumuuntajan maadoitusvastusarvon mittaukseen ja määräaikaistarkastukseen. Menetelmää voidaan käyttää määräaikaismittaukseen vain, jos jokaisesta edellisestä käännepistemenetelmän mittaussjaksosta olosuhteet säilyivät muuttamattomaksi. (Kauppila ym. 2019, 151 – 152.)

Sauvaton menetelmä on yksinkertaisin maadoitusvastusarvon mittausmenetelmä, joka ei vaati mitään erikoiskytkentöjä tai käyttökeskeytyksiä. Järjestelmän huono puoli, ettei se sovellu kaikille maadoituksille ja sen mittaustarkkuus on yleensä huonompi käännepistemenetelmän verrattuna. Menetelmää on hyödynnetty useiden kaupallisten- tai teollisuuslaitosten maadoituksien mittaukseen.

Edellisien ja muiden maadoitusvastusarvon mittausmenetelmien valinnassa otetaan huomioon seuraavia asioita:

- mahdollisuus suorittaa mittaukset jännitteettömänä vai jännitteisenä
- mitattavan elektrodijärjestelmän laajuus ja muoto
- maadoituselektrodin irrottamisen mahdollisuus

- mittausalueen maaperän tyyppi ja johtavuus
- mittauksen tarkoitus ja tarkkuus
- muut mittausolosuhteet (Chauvin Arnoux 2018, 5; Kauppila ym. 2019, 152).

8 SUORITETUT MITTAUKSET

Mittaukset suoritettiin loka-marraskuun vaihteessa. Yleensä mittauksia ei suositella tehtävän roudan aikana, vaan roudan sulamisen jälkeen. Seuraavat mittaukset tehtiin, kun maa oli noin viisi senttimetriä jäätynyt.

Kaikki mittaukset suoritettiin Kemin toimipisteessä, Tietokatu 1:ssä olevalle pylväsmuuntajalle. Mittaukset tehtiin käännepiste- ja kaksijohtimisella menetelmällä. Mittaukset suoritettiin maadoitusvastusmittarilla.

8.1 Mittauskohde

Mittaukset tehtiin Kemin toimipisteessä, Tietokatukatu 1:ssä sijaitsevan parkkipaikan puoleisen ilmalinjan pylväsmuuntajalle (Kuva 1). Koska pylvään alustassa sijaitsee vain yksi maadoitus, muuntajan mitattavaa maadoituselektrodia ei tarvinnut irrottaa mittauksen aikana mittausmenetelmästä riippumatta. Apuelektrodeja asennettiin parkkipaikan ja tontin rajalle mitattavasta elektrodista koilliseen suuntaan. Maan pintakerros koostui kivistä.



Kuva 1. Sähkö- ja automaatiokoulutuksen opetuslaitteiston 20 kV:n ilmalinjan pylväsmuuntaja Kemin toimipisteessä, Tietokatu 1.

taaelektrodi asennettiin maaperään noin 130 m mitattavasta maadoituselektrodista. Aluksi apujännite-elektrodi asennettiin maaperään 10 m apuvirtaelektrodista. Sitten apujännite-elektrodin mittausta paikkaa siirrettiin virtasauvaan ja maadoituselektrodiin nähden 10 m:n välein. Yhteensä tehtiin seitsemän mittausta eli kuusi apujännite-elektrodin siirtoa.

Kaikki mittausjohtimet vedettiin keloilta kokonaan suoraksi ja vältettiin silmukoita. Mittarin maadoituselektrodin terminaalista lähtevä johdin kytkettiin muuntajan maadoitusjohtimeen. Muut apuelektrodeihin menevät mittausjohtimet kytkettiin omiin terminaaleihin. Mittarin ulostulojännite ja -taajuus ovat jo asentaneet 50 V ja 128 Hz maksiimiarvoiksi, eikä niitä tarvitse muuttaa. Tarvittaessa nämä arvot voidaan muuttaa käyttökohteen tai olosuhteen mukaan.

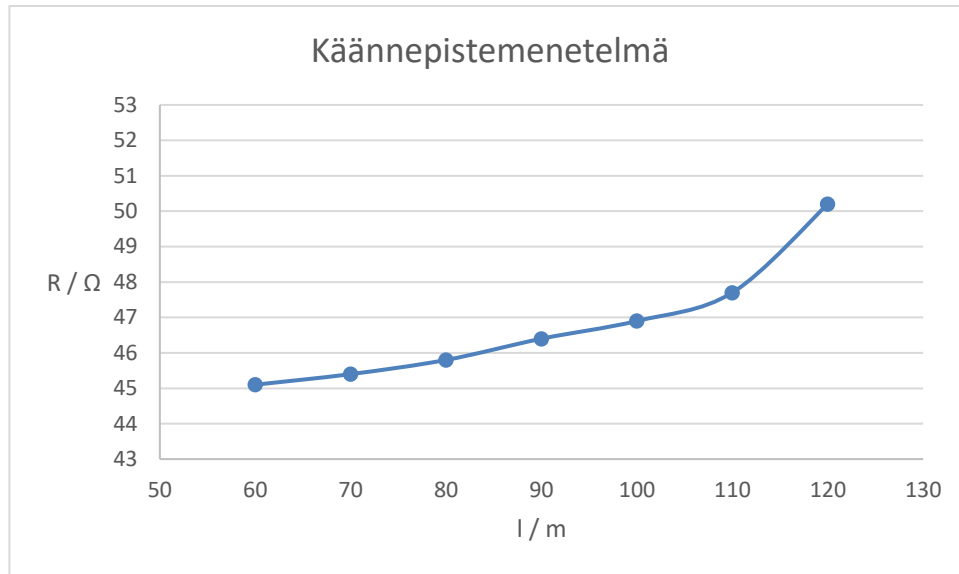
Megger DET4TC2 maadoitusvastusmittarilla maadoitusvastusarvon mittaus voidaan suorittaa nollauksella tai ilman nollausta. Mittausten aikana testitulokset nollauksella olivat vain 0,1 Ω pienempiä, kuin ilman nollausta. Siksi tässä opinnäytetyössä esitettiin vain ne mittaukset, jotka tehtiin nollaamatta.

Yhteensä suoritettiin seitsemän maadoitusvastusarvon mittausta ilman nollausta. Mittaustulokset on esitelty taulukossa 11.

Taulukko 11. Käännepistemenetelmän mittaustulokset.

Etäisyys maadoituselektrodista / m	60	70	80	90	100	110	120
Mitattu maadoitusvastusarvo / Ω	45,1	45,4	45,8	46,4	46,9	47,7	50,2

Taulukon 11 tuloksista piirrettiin maadoitusvastusarvon R kuvaaja apujännite-elektrodin etäisyyden l funktiona (Kuvio 38).



Kuvio 38. Käännepistemenetelmän maadoitusvastusarvon kuvaaja apujännite-elektrodin etäisyyden funktiona.

8.4 Kaksijohtiminen mittaus

Mittaus suoritettiin samana päivänä kuin käännepistemenetelmän mittaukset. Tässä mittauksessa pylväsmuuntajan maadoitusvastusarvoa mitattiin kytkemällä maadoituselektrodi mittarin kautta toiseen maadoituspisteeseen, jona tässä mittauksessa toimi parkkipaikan lämmitystolpan runko (Kuva 3).



Kuva 3. Parkkipaikan lämmitystolppa Kemin toimipisteessä, Tietokatu 1:ssä.

Mittarin toinen terminaalista lähtevä johdin kytkettiin muuntajan maadoitusjohtimeen ja toinen lämmitystolpan runkoon. Mittarin ulostulojännite ja taajuus ovat samanlaiset kuten käännepistemenetelmän mittauksessa.

Suoritettiin yksi maadoitusvastusarvon mittauss. Tulokseksi saatiin 44,9 Ω .

9 TULOSTEN KÄSITTELY

Käännepistemenetelmällä maadoitusvastusarvo voidaan saada käyrän selvältä vaakaosuudelta, käännepisteestä ja 60 % tai 62 % sääntöjen mittauspisteistä. Käyrän muodosta, joka koko ajan suureni, voitiin päätellä, että mitattava maadoituselektrodi sijaitsi riittävässä homogeenisessa maaperässä, jolloin luotettavaa maadoitusvastusarvoa oli helpompi määrittää. Koska käyrältä ei löydetty selvää vaakaosuutta, otettiin maadoitusvastusarvo ensin käännepisteestä ja verrattiin sitä 60 % säännön arvoon.

Mittaus maaperän ollessa jäätyneenä vaikuttaa käyrän muotoon, josta selvä käännepiste on siten vaikeampi löytää. Kuviossa 38 käyrän kasvu tasaisempi noin 80 m:n pisteen, minkä jälkeen kasvu huomattavasti suureni. Taulukosta 11 saatiin 80 m pisteen vastaava maadoitusvastusarvo, joka oli 45,8 Ω . Jos maadoitusvastusarvon mittaus tehtiin 60 % säännöllä, saatu tulos olisi 78 m pisteessä, eli 45,8 Ω :n lähellä. Käännepistemenetelmän tuloksista voitiin päätellä, että arvioitu maadoitusvastusarvo oli $\leq 45,8 \Omega$.

Kaksijohtimisessa mittauksessa maadoitusvastusarvoksi saatiin 44,9 Ω . Liitteen 3 mukaan sekä käännepiste- että kaksijohtimisen menetelmien mittauksarkkuudet tällä mittarilla ovat samanlaiset (2% \pm 3 kymmenystä). Kahden eri menetelmän tuloksista voitaisiin päätellä, että arvioitu maadoitusarvo oli 44,9 – 45,8 Ω :n välillä.

Kuitenkin, todellinen maadoitusvastusarvo voi olla vielä pienempi kuin arvioitu arvo. Maadoituselektrodin ja apuvirtaelektrodin vaikutusalueet suurentavat maadoitusvastusarvoa, jos apujännite-elektrodi sijaitsee jommallakummalla vaikutusalueella. Tämä voisi selittää myös, miksi käännepistemenetelmän arvioitu arvo oli suurempi kaksijohtimiseen mittauks tuloksen verrattuna. Kaksijohtimisen mittauks tulosta voivat suurentaa lämmitystolpan rakenteen mahdolliset eristävät osat tai mittarin ei riittävän korkea syöttövirta. Kaiken lisäksi molemmat mittaukset suoritettiin maaperän ollessa jäätyneenä, joka itsessään suurensi maadoitusvastusarvoa.

Suurin sallittu maadoitusvastusarvo voidaan määrittää vain muuntopiirin maadoitustavan ja sähköaseman lähdön maasulun poiskytkentäajan tiedoista. Näin saatua maadoitusvastusarvoa voidaan verrata sallittuun arvoon. Sallittu arvo on laskettava.

10 POHDINTA

Maadoitusvastusarvon määrittäminen vaatii usein sen mittausta. Mittaus koostuu mitattavan maadoitusverkon tiedon hankinnasta, mittausmenetelmien valinnasta ja muista mittaukseen liittyvistä ongelmista, joihin mittauksen tekevä henkilö voi törmätä mittauksen aikana. Nykyiset maadoitusvastusmittarit ja testauslaitteet sallivat mitata maadoitusvastusarvoa erilaisilla mittausmenetelmillä samalla mittarilla, joka puolestaan huomattavasti parantaa lopputulosta.

Pylväsmuuntajan maadoitusvastusarvon mittaus kahdella eri mittausmenetelmällä antaa luotettavamman maadoitusvastusarvoalueen selvityksen. Lisäksi vertailemalla kahdella eri menetelmällä saatuja arvoja toisiinsa virhetekijät vähenyvät. Vaikka lopputulokset näissä mittauksissa olivat hyvin teorian mukaisia, erilaisissa olosuhteissa nämä tulokset voisivat olla hyvin erilaisia. Myös rinnakkaisien apuelektrodien käyttö voisi antaa paremmat tulokset.

Mittaustuloksen oikeellisuuteen nähden opinnäytetyössä tehdyt maadoitusmittaukset olisi hyödyllistä suorittaa myös keväällä, heti lumen sulamisen jälkeen, kuten teoriassa suositellaan, ja vertailla lopputuloksia syksyn tuloksiin. Riittävästi homogeeninen maaperä helpotti käännepisteen löytämistä, mutta epähomogeenisessa maaperässä se voisi olla jopa mahdotonta. Myös 60 % tai 62 % säännöt tässä tapauksessa voivat antaa epäluotettavat tulokset. Tämän takia, maaperän johtavuus ja mittaus epähomogeenisessa maaperässä, voisivat olla jatkotutkimuksen aiheita.

Mittaus maaperän ollessa jäätyneenä ja mittauspaikan sijainti aiheuttivat tiettyjä ongelmia. Mittaussuoraa tai tasasivuista kolmiota oli hyvin vaikea saada rajoitetun sijoitusalueen vuoksi. Samanaikaisesti apuelektrodien sijoitusta vaikeutti kivinen maaperän rakenne, lumi ja jää. Tästä johtuen kaksijohtimisen menetelmän mittaus oli helpompi suorittaa käännepistemenetelmään verrattuna. Myös kaksijohtimisen menetelmän lopputulos oli parempi kuin käännepistemenetelmän lopputulokset.

Kuitenkin, mitattavalla paikalla oli suuri vaikutus mittausmenetelmän valintaan. Valitettavasti, mittarin jokaista mittausmenetelmää ei voi suorittaa tutkittavaan

kohteeseen mm. maadoitusverkon rakenteen takia. Myös mittarin nollausominaisuutta oli turha käyttää, mutta tietyssä maadoitusverkossa sen käyttö voisi olla hyödyllistä.

Saatuja maadoitusvastusarvon tuloksia voidaan käyttää sallitun maadoitusvastusarvon määrittämiseen vain, jos tavoitteena ei ollut hyvin tarkka arvon mittaaminen. Mittaukset tehtiin menetelmillä, joita pidetään melko yksinkertaistettuina mittausmenetelminä. Niiden tarkkuus riittää yleensä määraaikaistarkastukseen, mutta vain, jos jokaisen mittauksen jaksona olosuhteet olivat muuttamattomia. Hyvin tarkkaa raja-arvoa määritettäessä tai maadoitusvastusarvon kasvun laskennassa kannattaa käyttää tarkempia menetelmiä, kuten voltti-ampeerimenetelmää.

Opinnäytetyön tuloksia voidaan hyödyntää sähkövoimatekniikan ammattiaineopinnoissa kuten maadoitusvastusmittausten suorittamisessa. Myös maadoitusmittarin käyttöä voidaan hyödyntää sähkömittauslaitteiston opetuksessa.

LÄHTEET

Annanpalo, J., Ikävalko, M., Koponen, J., Mäkelä, A., Ristilä, J., Sjögren, H., Taimisto, S. & Tiainen, E. 2012. Rakennusten salama- ja ylijännitesuojaus. 2., uusittu painos. Espoo: Sähköinfo Oy.

Chauvin Arnoux Maadoitusvastusten mittaussopas 2018. Viitattu 22.11.2019 <https://chauvin-arnoux.fi/wp-content/uploads/2014/09/Maadoitusvastuksen-mittausopas.pdf>

Fluke Maadoitusresistanssi 2017. Ohje 2/2017. Vantaa: Fluke Finland Oy. Viitattu 22.11.2019 https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/9902801_FIN_A_W.PDF

Heard, M. 2012. Megger DET Sarja Maadoitetut elektroditestit. Sisäinen intranet. Tulostettu 29.10.2019.

Kauppila, J., Koivisto, P., Nurmen, T., Tiainen, E. & Ylinen, T. 2019. Maadoituskirja. 7., uudistettu painos. Espoo: Sähköinfo Oy.

Monni, M. 2015. Jakeluverkon käyttötehtävät. 5., kokonaan uudistettu painos. Helsinki: Adato Energia.

SFS 6000-1:2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 1: Peruseriaatteet, yleisten ominaisuuksien määrittely ja määritelmät. Helsinki: Suomen standardisointiliitto SFS ry. Viitattu 2.2.2020. www.sfs.fi

SFS 6000-5-54:2017. Pienjänniteasennukset. Osa 5-54: Sähkölaitteiden valinta ja asentaminen. Maadoittaminen ja suojaohjaimet. Helsinki: Suomen standardisointiliitto SFS ry. Viitattu 2.2.2020. www.sfs.fi

SFS 6001:2018. Suurjännitesähköasennukset. Helsinki: Suomen standardisointiliitto SFS ry. Viitattu 21.11.2019. www.sfs.fi

Tolonen, H. 2013. Laajan maadoitusjärjestelmän todentaminen ja dokumentointi KENET Oy:n jakeluverkossa. Centria ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Sähkötekniikan koulutusohjelma.

Ylinen, T. 2016. Maadoitusopas. 3., uudistettu painos. Espoo: Sähköinfo Oy.

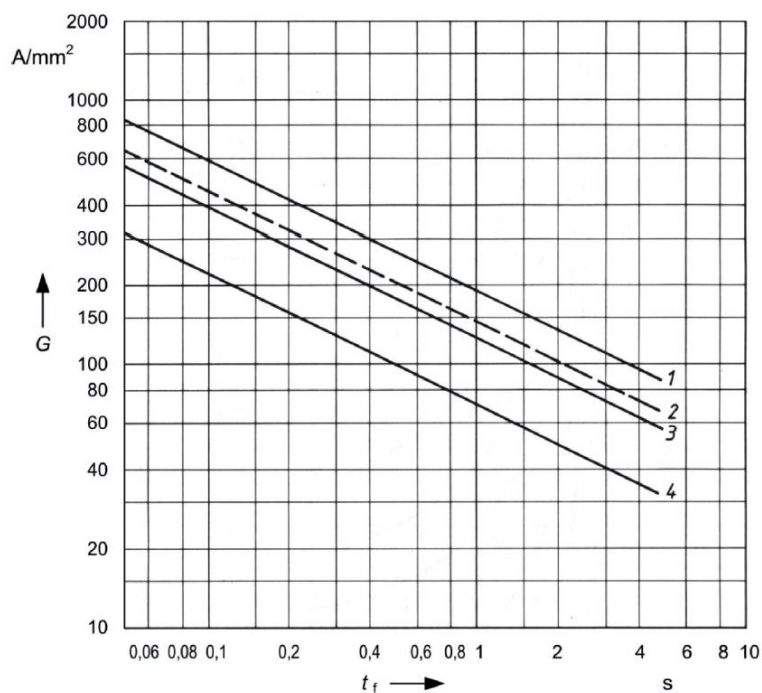
LIITTEET

- Liite 1. Maadoitusjohtimen ja -elektrodin kuormitettavuuden laskenta
- Liite 2. Maadoituskortti
- Liite 3. Maadoitusvastusmittarin tekniset erittelyt

Liite 1 1(3)

Taulukko D.2 Jatkuvan virran muunnoskerroin loppulämpötilasta 300 °C toiseen loppulämpötilaan

Loppulämpötila °C	Muunnoskerroin
400	1,2
350	1,1
300	1,0
250	0,9
200	0,8
150	0,7
100	0,6

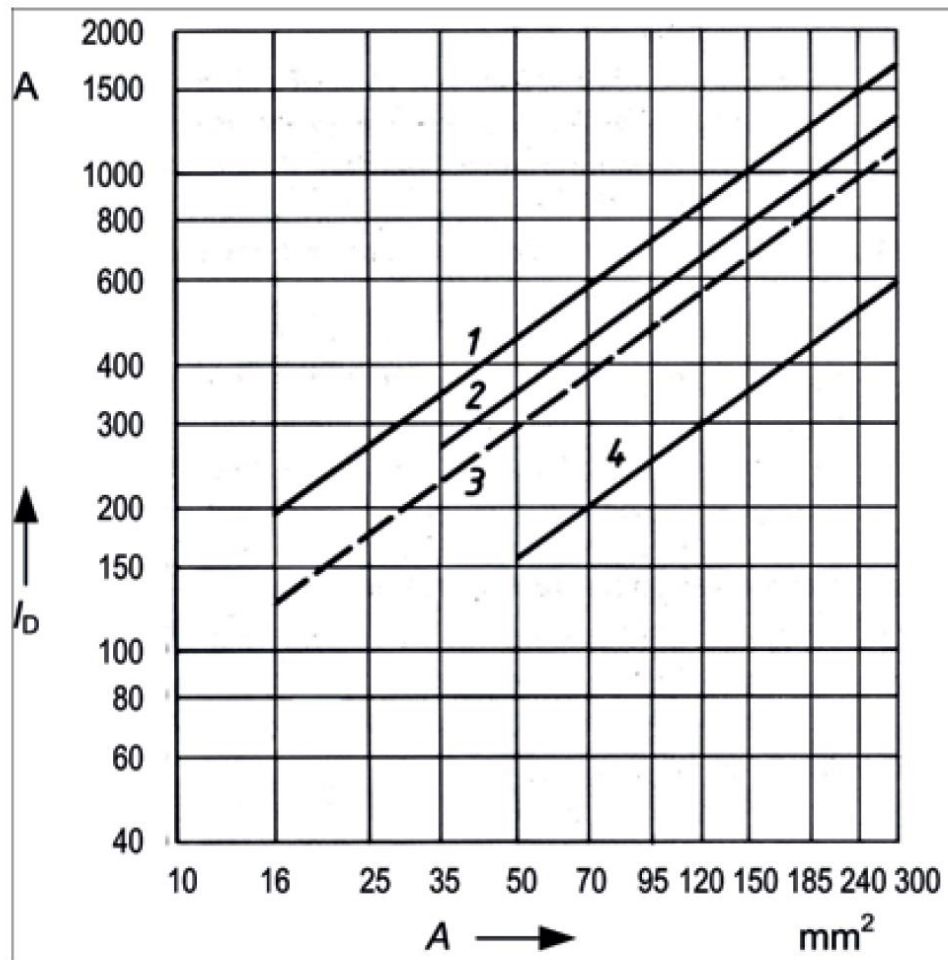


Viivat 1, 3 ja 4 pätevät loppulämpötilalle 300 °C, suora 2 pätee loppulämpötilalle 150 °C.

- 1 Paljas tai sinkkipäällysteinen kupari
- 2 Tinattu tai lyijyvaippainen kupari
- 3 Alumiini (vain maadoitusjohtimena)
- 4 Sinkitty teräs

Kuva D.1 Maadoitusjohtimien ja maadoituselektrodien sallittu oikosulkuvirran tiheys G vikavirran kestoajan t_f funktiona

Liite 1 2(3)

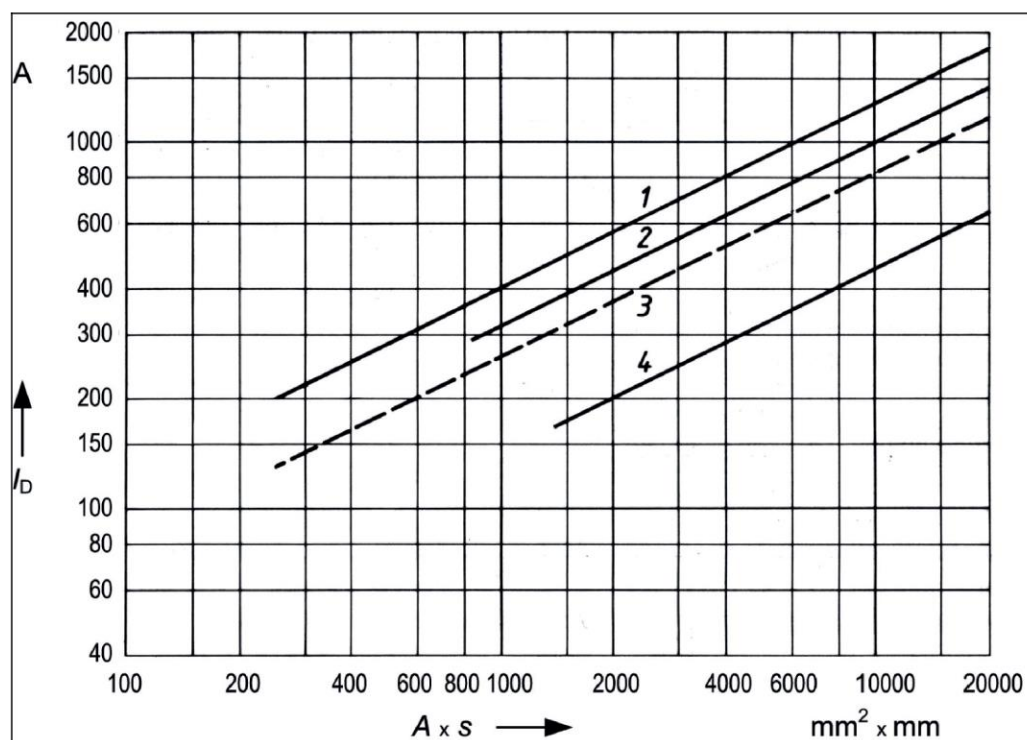


a) Poikkipinnaltaan (A) pyöreän maadoitusjohtimen sallittu jatkuva virta I_D

Viivat 1, 2 ja 4 pätevät loppulämpötilalle 300 °C, ja suora 3 pätee loppulämpötilalle 150 °C.
[Taulukossa D.2](#) on esitetty muunnoskertoimet toisille loppulämpötiloille

- 1 Paljas tai sinkkipäällysteinen kupari
- 2 Alumiini
- 3 Tinattu tai lyijyvaippainen kupari
- 4 Sinkitty teräs

Liite 1 3(3)



b) Poikkipinnaltaan suorakulmaisen maadoitusjohtimen sallittu jatkuva virta I_D poikkipinnan A ja profiilin ympärysmittan s tulon ($A \times s$) funktiona

Viivat 1, 2 ja 4 pätevät loppulämpötilalle 300 °C, suora 3 pätee loppulämpötilalle 150 °C. [Taulukossa D.2](#) on esitetty muunnoskertoimet muille loppulämpötiloille

- 1 Paljas tai sinkkipäällysteinen kupari
- 2 Alumiini
- 3 Tinattu tai lyijyvaippainen kupari
- 4 Sinkitty teräs

Kuva D.2 Maadoitusjohtimen sallittu jatkuva virta I_D

Liite 2

MAADOITUSKORTTI URAKOITSIJA: KOKKOLAN ENERGIA																																																																																																																																																																																																																																			
Muuntamon tai kytkinlaitoksen tiedot																																																																																																																																																																																																																																			
Numero		Nimi		Osoite																																																																																																																																																																																																																															
Pvm		Allekirj.		Selvennys																																																																																																																																																																																																																															
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 30%;"> <p>Mittauksen svv</p> <p><input type="checkbox"/> Kunnossapito- ja huoltomittaus</p> <p><input type="checkbox"/> Käyttöönottomittaus</p> <p><input type="checkbox"/></p> <p>Mittausmenetelmä</p> <p><input type="checkbox"/> Käännepistemenetelmä</p> <p><input type="checkbox"/> Pihtimittaus</p> <p><input type="checkbox"/> Vastusmittaus</p> <p><input type="checkbox"/></p> </div> <div style="width: 30%;"> <p>Mittauskohde</p> <p><input type="checkbox"/> Muuntamo</p> <p><input type="checkbox"/> Erotinasema</p> <p><input type="checkbox"/> Linjaerotin</p> <p><input type="checkbox"/> Muu</p> <p>Kytkeinlaitoksen potentiaalinoitus</p> <p><input type="checkbox"/> 1 rengasta</p> <p><input type="checkbox"/> 2 rengasta</p> </div> <div style="width: 30%;"> <p>Laitteisto maadoitettu</p> <p><input type="checkbox"/> Yhdestä</p> <p><input type="checkbox"/> Useammasta</p> </div> <div style="width: 25%;"> <p>Mittaussuunta:</p> <table border="1" style="width: 100%; height: 100px; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td></td><td></td><td></td><td>P</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>L</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>I</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td>E</td><td></td><td></td><td></td></tr> </table> </div> </div>										P																		L						I																		E																																																																																																																																																																															
			P																																																																																																																																																																																																																																
L						I																																																																																																																																																																																																																													
			E																																																																																																																																																																																																																																
<p>Maadoituksen mittaus</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 10%;">Pvm.</th> <th style="width: 20%;">Mittaaja</th> <th style="width: 15%;">Suoja / Ω</th> <th style="width: 15%;">Käyttö / Ω</th> <th style="width: 15%;">Yhdistetty / Ω</th> <th style="width: 15%;">Pihtimitt. / Ω</th> <th style="width: 15%;">Pot.ohj. / Ω</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table> <p>Vaadittu arvo</p>							Pvm.	Mittaaja	Suoja / Ω	Käyttö / Ω	Yhdistetty / Ω	Pihtimitt. / Ω	Pot.ohj. / Ω																																																																																																																																																																																																																						
Pvm.	Mittaaja	Suoja / Ω	Käyttö / Ω	Yhdistetty / Ω	Pihtimitt. / Ω	Pot.ohj. / Ω																																																																																																																																																																																																																													
<p>Käännepistemenetelmä</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 10%;">Ohm</th> <th style="width: 15%;">60</th> <th style="width: 15%;">80</th> <th style="width: 15%;">100</th> <th style="width: 15%;">120</th> <th style="width: 15%;">140</th> <th style="width: 15%;">160</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table>							Ohm	60	80	100	120	140	160																																																																																																																																																																																																																						
Ohm	60	80	100	120	140	160																																																																																																																																																																																																																													
<p>Ry / Ω</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 5%;">Ry / Ω</th> <th style="width: 15%;">0</th> <th style="width: 15%;">20</th> <th style="width: 15%;">40</th> <th style="width: 15%;">60</th> <th style="width: 15%;">80</th> <th style="width: 15%;">100</th> <th style="width: 15%;">120</th> <th style="width: 15%;">140</th> <th style="width: 15%;">160</th> <th style="width: 15%;">180</th> <th style="width: 15%;">200</th> <th style="width: 15%;">220</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>15</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>14</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>13</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>12</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>11</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>10</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>9</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>8</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>7</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right;">I / m</p>							Ry / Ω	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	15													14													13													12													11													10													9													8													7													6													5													4													3													2													1													0												
Ry / Ω	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220																																																																																																																																																																																																																							
15																																																																																																																																																																																																																																			
14																																																																																																																																																																																																																																			
13																																																																																																																																																																																																																																			
12																																																																																																																																																																																																																																			
11																																																																																																																																																																																																																																			
10																																																																																																																																																																																																																																			
9																																																																																																																																																																																																																																			
8																																																																																																																																																																																																																																			
7																																																																																																																																																																																																																																			
6																																																																																																																																																																																																																																			
5																																																																																																																																																																																																																																			
4																																																																																																																																																																																																																																			
3																																																																																																																																																																																																																																			
2																																																																																																																																																																																																																																			
1																																																																																																																																																																																																																																			
0																																																																																																																																																																																																																																			
<p>Pisteet 160...60 m mitataan, eli 6 pakollista mittauspistettä käyrän muodostamista varten.</p> <p>Ry-asteikko voidaan tarpeen mukaan kymmenkertaistaa merkkamalla siihen nollat perään.</p>																																																																																																																																																																																																																																			

Liite 3

TEKNISET ERITTELYT

Vain sietokyvyn tai rajojen sisällä tapahtuvat arvot ovat tarkkaa tietoa. Muuttujat toleranssin ulkopuolella ovat vain yleistä informaatiota varten.

Ingressisuojauksen luokitus: IP54

C -pylväs, P-pylväs ja kohinantarkastus:
Automaattinen

Kohinasuodin: 40 V pk - pk (14 V rms)

2-, 3-, ja 4-johdintestit: Kyllä, ilman oikokaapelia

Ei irtikytkentätestiä (ART): Kyllä ICLAMPin avulla

Pylväätön mittaus:

Kyllä ICLAMPilla ja VCLAMPilla

Instrumentin ulostulo:

Jännite: ± 25 V tai ± 50 V 128Hz (DET3TA, DET3TC, DET3TD, DET4TD2 ja DET4TR2)

Jännite: ± 25 V tai ± 50 V tai 94 Hz, 105 Hz, 111 Hz, ja 128Hz (DET4TC2 ja DET4TR2)

Virta: 4.5 mA tai 0.45mA (DET3TA, DET3TC, DET3TD, DET4TD2 ja DET4TR2)

Virta:

4.5 mA tai 0.45mA ja 0.045 mA (DET4TC2 ja DET4TR2)

Maadoitusvirta-alue johdinpidikkeellä:

0.5 mA - 19.9 A välillä

Maadoitusvirta tarkkuus: 5% ± 3 merkkiä

Maadoitusjännitealue: 0 - 100 Vac välillä

Maadoitusjännite tarkkuus: 2% ± 2 V

Resistanssialue:

2, 3 tai 4 pistemittaus: 0.01 - 200 k Ω

Liitetty tankotekniikka (ART): 0.01 - 200 k Ω

Pylväättömät mittaukset: 0.01 – 200 Ω

Resistanssitarkkuus:

2P mittaukset: 2% ± 3 kymmenystä

3P mittaukset: 2% ± 3 kymmenystä

4P mittaukset: 2% ± 3 kymmenystä

ART mittaukset: 5% ± 3 kymmenystä

Pylväätön mittaukset: 7% ± 3 kymmenystä

Maksimi anturesistanssi:

Rp raja: 200 k Ω (50 V lähtöjännite)

Rc raja: 200 k Ω (50 V lähtöjännite)

Rajat alennettu 100 k Ω 25 V lähtöjännitteelle

Rajat alennettu 5 k Ω 0.01 Ω erottelulle

Näyttö: 3½ merkin korkeakontrasti nestekide, taustavalaistu

Paristotyyppi:

DET3TA, DET3TC, DET3TD, DET4TD2, DET4TC2 - 8 off AA (LR6) kuivaparit

DET4TCR2 – 8 off AA (LR6) NiMH ladattavat paristot

Käyttölämpötila-alue:

-15 °C ja +55 °C välillä / 5 °F ja 131 °F välillä

Säilytyslämpötila-alue:

-40 °C ja +70 °C välillä / -40 °F ja 158 °F välillä

Turvallisuus

Noudattaa IEC61010-1 100 V CAT IV vaatimuksia terminaaliparien välillä.

EMC

Noudattaa IEC61326-1

Toiminnallisia epävarmuustekijöitä: käynnin
www.megger.com

Standardien yhteensopivuus:

Vastaa KEMA K85B:n vaatimuksia

Vastaa seuraavia EN61557:n osavaatimuksia:

“Sähköinen turvallisuus matalan jännitteen jakelujärjestelmissä 1000 V a.c asti, sekä 1500 V d.c. - Testauslaitteessa, mittaava tai monitoroiva suojaustoimenpide”.

Osa 1 – Yleiset vaatimukset

Osa 5 – Maadoitusvastus

Mitat: 203 mm x 148 mm x 78 mm

Paino: 1 kg